



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

UPC -ESEIAAT

Grado en Ingeniería en Vehículos Aeroespaciales

---

# Estudio de la adaptación del proceso de soldadura MIG, a proceso de fabricación aditiva para obtención de piezas tridimensionales.

---

## *Memoria*

**Estudiante:** Martín Sánchez, Gabriel

**Director:** Ortiz Marzo, José Antonio

**Grado:** Ing. en Vehículos Aeroespaciales.

**Fecha de entrega:** 30/06/2020

**Convocatoria:** QP 2019-2020



# Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado a realizar esta Tesis de Grado. Primeramente, quiero agradecer a mi familia y amigos por prestarme su apoyo constante e incondicional. Su soporte en momentos de flaqueza consigue hacerme avanzar, mejorar y superarme día a día.

También, me gustaría agradecer a mi director y maestro José Antonio Ortiz Marzo por guiarme a lo largo de todo este estudio. Desde el primer momento mostró interés y plena disponibilidad para ayudarme en lo que fuera necesario.

A todos ellos, gracias.

# Resumen

En este estudio se realiza una adaptación del proceso de soldadura por arco eléctrico TIG, del inglés *Tungsten Inert Gas*, para acomodarlo a una instalación de fabricación aditiva con el objetivo de producir piezas metálicas tridimensionales. La máquina base de fabricación aditiva sobre la que se trabaja es una impresora 3D FDM. Se estudian los parámetros de soldeo adecuados y se diseñan y adaptan todos los componentes necesarios para este proceso de fabricación. También, se diseñan y programan las trayectorias de la máquina. La adaptación realizada sería válida, también, para procesos de soldadura MIG, del inglés *Metal Inert Gas*, pero deberían introducirse algunos pequeños cambios en el diseño y en la programación (a lo largo de este estudio se explica por qué se ha derivado la adaptación a un proceso TIG).

En primer lugar, se muestran las tecnologías de fabricación aditiva más comunes y se definen brevemente. A continuación, se exponen las ventajas de una y otra tecnología. Seguidamente, se introducen los procesos de soldeo por arco eléctrico y se realiza una valoración del método más adecuado para adaptar a la maquinaria disponible. Una vez escogido el método de soldadura, se diseñan todas las adaptaciones necesarias y todo el proceso de fabricación y, finalmente, se procede a realizar unos planes de experimentación que permitirán ajustar la máquina y evaluar la calidad de cada una de las piezas fabricadas. Se describen todas y cada una de las modificaciones y calibraciones necesarias tanto a nivel de *Hardware* como de *Software*. Por último, los resultados obtenidos son evaluados y contrastados para inferir mejoras en el conjunto del proceso de fabricación diseñado.

## Palabras clave:

Fabricación aditiva, Soldadura, Arco eléctrico, MIG, TIG, Impresión 3D, FDM.

*\*English version below.*

## Abstract

In this study, an adaptation of the electric arc welding process TIG (*Tungsten Inert Gas*) is carried out to accommodate it to an additive manufacturing installation with the aim of producing three-dimensional metal parts. The additive manufacturing base machine that is being worked on is an FDM 3D printer. The appropriate welding parameters are studied and all the components necessary for this manufacturing process are designed and adapted. In addition, the tracks of the machine are designed and programmed. The adaptation made, also, would be valid for MIG (*Metal Inert Gas*) welding processes but some small changes should be made in the design and programming (throughout this study it is explained why the adaptation has been lead to a TIG process).

First, the most common additive manufacturing technologies are shown and briefly defined. Next, the advantages of one and another technology are exposed. Afterwards, the electric arc welding processes are introduced, and an assessment of the most appropriate method to adapt to the available machinery is made. Once the welding method has been chosen, all the necessary adaptations and the entire manufacturing process are designed, and finally, experimentation plans are made to adjust the machine and to evaluate the quality of each of the manufactured parts. Each one of the necessary modifications and calibrations are described both hardware and software level. Finally, the results obtained are evaluated and contrasted to infer improvements in the whole manufacturing process that has been designed.

### Keywords:

Additive manufacturing, Welding, Arc Welding, MIG, TIG, 3D printing, FDM.

## Declaración de honor

Declaro que,

el trabajo en esta Tesis de Grado es completamente mi propio trabajo,  
ninguna parte de esta Tesis de Grado se ha tomado del trabajo de otras personas sin darles mención,  
todas las referencias han sido claramente citadas.

Entiendo que la infracción de esta declaración me deja sujeto a las acciones disciplinarias previstas por la *Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH*.

Martín Sánchez, Gabriel

Junio de 2020.

Título de la tesis:

Estudio de la adaptación del proceso de soldadura MIG, a proceso de fabricación aditiva para obtención de piezas tridimensionales.

# Tabla de Contenidos

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>I</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>II</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>III</b>
<b>Declaración de honor.....</b>	<b>IV</b>
 <b>Tabla de Contenidos .....</b>	 <b>V</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de Tablas.....</b>	<b>XI</b>
<b>Acrónimos y Siglas.....</b>	<b>XIII</b>
 <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	 <b>16</b>
1.1. Objetivo.....	16
1.2. Alcance .....	16
1.3. Requerimientos .....	17
1.4. Justificación .....	18
1.5. Condición de éxito .....	18
1.6. Estructura del documento .....	18
 <b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	 <b>20</b>
2.1. Introducción .....	20
2.2. La Fabricación Aditiva .....	21
2.3. Evolución de la fabricación aditiva.....	24
2.4. Principales procesos de fabricación aditiva .....	26
2.4.1 Extrusión de material.....	28
2.4.2 Fusión de lecho en polvo .....	29
2.4.3 Inyección de material.....	30
2.4.4 Inyección de aglutinante .....	30
2.4.5 Laminación de hojas .....	31
2.4.6 Fotopolimerización en tanque .....	33
2.4.7 Deposición de energía dirigida .....	33
2.5. Marco normativo de la fabricación aditiva .....	35
2.6. Procesos afines al proyecto.....	36

<b>3. MÉTODOS DE SOLDADURA.....</b>	<b>38</b>
3.1. Introducción.....	38
3.2. Soldadura SMAW.....	40
3.3. Soldadura GTAW.....	41
3.4. Soldadura GMAW.....	42
3.5. Soldadura FCAW.....	43
3.6. Comparativa de los procesos de soldadura.....	44
3.7. Método de soldadura escogido.....	45
3.8. Seguridad en la soldadura.....	46
<b>4. DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE LA MAQUINARIA .....</b>	<b>50</b>
4.1. Máquina de fabricación aditiva.....	50
4.1.1 Montaje de la impresora 3D.....	51
4.1.2 Calibración y pruebas de impresión.....	52
4.2. Configuración del equipo de soldadura.....	55
4.2.1 Equipo de soldadura.....	55
4.2.2 Material de aporte.....	57
4.2.3 Tipo de corriente en soldaduras TIG.....	58
4.2.4 Electrodo de tungsteno.....	59
4.2.5 Antorcha TIG.....	61
4.2.6 Equipo gas protector.....	63
4.3. Soporte de la antorcha.....	64
4.4. Equipo alimentador del material de aporte.....	70
4.5. Protecciones.....	76
<b>5. PROGRAMACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS.....</b>	<b>79</b>
5.1. Metodología.....	79
5.2. Electrónica, <i>firmware</i> y programas de laminación.....	81
5.3. Modificaciones del código G y calibración.....	83
5.3.1 Código G y comandos básicos.....	83
5.3.2 Modificaciones del código G.....	85
5.3.3 Calibraciones de la máquina.....	88
5.4. Prueba estimación parámetros equipo.....	90
5.4.1 Introducción.....	90
5.4.2 Plan de experimentación.....	90
5.4.3 Análisis de los resultados obtenidos.....	96

5.5.	Prueba paredes verticales e inclinadas .....	101
5.5.1	Introducción.....	101
5.5.2	Plan de experimentación.....	101
5.5.3	Análisis de los resultados obtenidos.....	109
5.6.	Realización de probetas .....	113
5.6.1	Introducción.....	113
5.6.2	Plan de experimentación.....	113
5.6.3	Análisis de los resultados obtenidos.....	119
5.7.	Resumen de las experimentaciones .....	120
<b>6.</b>	<b>PLANIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN.....</b>	<b>122</b>
6.1.	Estructura de descomposición del trabajo.....	122
6.2.	Descripción de tareas y horas necesarias. ....	123
6.3.	Diagrama de Gantt .....	125
<b>7.</b>	<b>RESUMEN DEL PRESUPUESTO.....</b>	<b>127</b>
<b>8.</b>	<b>IMPLICACIONES MEDIOAMBIENTALES .....</b>	<b>128</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>130</b>
9.1.	Futuras líneas de trabajo .....	132
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>133</b>



## Lista de Figuras

Figura 1: Desarrollos de la industria. Fuente: [5].	20
Figura 2: Jet nozzle aeroespacial fabricado por RENISHAW® mediante su tecnología similar al SLM.	22
Figura 3: Proceso de optimización topológica. Fuente: Frustrum [8].	23
Figura 4: Software NX CAM Hybrid Additive Manufacturing. Fuente: Siemens PLM Software.	24
Figura 5: Tamaño del mercado de impresión en 3D, según tecnología, en EE. UU. durante el período de 2014-2025 (en millones de dólares). Fuente: Grandviewresearch. [11]	26
Figura 6: Conjunto de tecnologías de fabricación aditiva según la terminología designada por las organizaciones ISO/ASTM. Fuente: ISO/ASTM.	27
Figura 7: Esquema de la tecnología de extrusión de material. Fuente: [14].	28
Figura 8: Proceso de fusión de lecho en polvo. Fuente: [14].	29
Figura 9: Proceso de inyección de material. Fuente: [14].	30
Figura 10: Proceso de inyección de aglutinante. Fuente [14].	31
Figura 11: Proceso de laminación de hojas. Fuente: [17].	32
Figura 12: Proceso de fotopolimerización en tanque. Fuente: [14].	33
Figura 13: Proceso de deposición de energía dirigida. Fuente: [16].	34
Figura 14: Cabezal Meltio desarrollado por Sicnova®. A la derecha se pueden observar detalles del cabezal.	37
Figura 15: Pieza realizada mediante la tecnología Meltio de Sicnova® antes y después de mecanizar.	37
Figura 16: Procesos de soldadura y técnicas afines. Fuente: American Welding Society. Jeffus, L., 2009. Pág. 9, Tabla 1-1 de [22].	39
Figura 17: Equipo de soldadura SMAW. Fuente: Jeffus, L., 2009. Pág. 10. [22].	40
Figura 18: Equipo de soldadura GTAW. Fuente: Jeffus, L., 2009. Pág. 11. [22].	41
Figura 19: Equipo de soldadura GMAW. Fuente: Jeffus, L., 2009. Pág. 11. [22].	43
Figura 20: Fotografías del equipo de soldadura GMAW. Fecha: 21/02/2020.	43
Figura 21: Ejemplo de pictograma necesario en los EPI que indica las especificaciones según norma EN 388 de riesgos mecánicos. Fuente: Scharlab. The lab sourcing group [23].	47
Figura 22: Guantes adecuados para la soldadura. Se pueden observar los pictogramas que indican la categoría y las especificaciones que cumplen, según norma. Fecha: 21/02/2020.	47
Figura 23: Careta de soldadura automática DIN 9-13. Fecha: 21/02/2020.	48
Figura 24: Tabla de referencia para la graduación de la careta según tipo de soldadura e intensidad (numeración DIN). Fuente: [24].	49
Figura 25: Impresora 3D Anet A8. Fuente: Documentación adjunta al equipo [25].	50
Figura 26: Fotografías que muestran el proceso de listado de material. De izquierda a derecha: Revisión piezas estructurales, revisión de tornillería y revisión de componentes eléctricos y piezas auxiliares. Fecha: 09/03/2020.	51
Figura 27: Fotografías del proceso de montaje de la impresora 3D Anet A8. Fecha: 09/03/2020.	52
Figura 28: Modelo 3D de la pieza prueba. Visualización en Ultimaker Cura 4.5.	53
Figura 29: Fotografías de la pieza obtenida en la primera prueba de impresión.	54
Figura 30: Equipo de soldadura Solter Core 200i. Fecha: 21/02/2020.	55
Figura 31: Serigrafía del equipo de soldadura Solter Core 200i. Fecha: 21/02/2020.	56
Figura 32: Fotografía del hilo ER-70S-6 de diámetro 0,8 mm. Fecha: 21/02/2020.	58
Figura 33: Fotografías de la antorcha y del cable de masa. Fecha: 21/02/2020.	61

Figura 34: Piezas principales de una antorcha TIG, con y sin difusor de gas. Fuente: Maquisol [30].	61
Figura 35: Bombona de argón puro de reducidas dimensiones (2,2 Litros). Fecha: 21/02/2020.	63
Figura 36: A la izquierda se muestra un ejemplo de un reductor de presión y a la derecha se muestra un ejemplo de un caudalímetro manual. Fuente: [32] y [33].	64
Figura 37: Mediante un recuadro morado se indican los anclajes del soporte con la máquina. Fuente: Manual de montaje de la impresora Anet A8 [25].	65
Figura 38: Imagen del diseño CAD del soporte de la antorcha de soldadura GTAW.	67
Figura 39: Imagen CAD que muestra el tubo guía del material de aporte. Éste llega hasta la boquilla de la antorcha GTAW con el fin de guiar y proteger el material de aportación. En la imagen se muestra el ángulo de deposición del material de aporte respecto al metal base.	67
Figura 40: Imagen CAD en la que se puede observar la pieza de caucho (se muestra coloreada de negro).	68
Figura 41: Posición del centro de masas del soporte de la antorcha. Vista frontal y de perfil.	68
Figura 42: Posición del centro de masas del soporte de la antorcha. Vista superior e isométrica.	69
Figura 43: Rodillos o roldanas de alimentación. Fuente: Fig. 10-30. Pág. 235. Jeffus, L. 2009. [22].	71
Figura 44: Ejemplo de un alimentador de hilo de un equipo GMAW preparado para hilos blandos de aluminio.	71
Figura 45: Croquis resorte de torsión. Se puede observar, en verde, el resorte en posición de equilibrio y, en rojo, en posición de trabajo o comprimido. Se puede observar un ángulo de compresión de $44,45^\circ \approx 0,78 \text{ rad}$ .	73
Figura 46: Imágenes CAD que muestran la colocación del muelle de torsión desde distintos puntos de vista.	74
Figura 47: Conducto guía del hilo de soldadura para mover el hilo desde el alimentador hasta el cabezal de la máquina. Fuente: [37].	74
Figura 48: Vistas isométricas del diseño CAD del alimentador de hilo.	75
Figura 49: Vista CAD detallada de las roldanas y vista CAD superior del mecanismo del alimentador del hilo.	75
Figura 50: Vista del CAD de la correcta alineación vertical y horizontal del sistema de guiado del hilo. En la imagen se puede observar el tubo guía perfectamente alineado con las ranuras de las roldanas.	75
Figura 51: Esquema de la composición de la plataforma de la máquina.	78
Figura 52: Esquema del proceso de fabricación aditiva.	80
Figura 53: Placa electrónica Anet A8. Fuente: Manuales facilitados con la impresora.	81
Figura 54: Superior: Geometría STL de partida. Inferior: Trayectorias generadas mediante el programa laminador.	91
Figura 55: Deformaciones en una chapa de metal base causadas por las contracciones de los cordones de soldadura.	96
Figura 56: Ejemplos de imperfecciones en soldaduras. Fuente: [49].	99
Figura 57: Imperfecciones generadas al realizar determinadas acciones en soldaduras GTAW. Fuente: Diap. 28 [50].	100
Figura 58: Defectos comunes en la deposición de cordones de soldadura individuales. Fuente: Fig. 4 [51].	100
Figura 59: A la izquierda el CAD de partida, a la derecha, el resultado obtenido mediante el laminador.	103
Figura 60: En la parte superior se muestra el modelo CAD de partida y, en la parte inferior, el resultado obtenido del laminador.	104

Figura 61: En la parte izquierda se muestra el modelo CAD de partida y, en la parte derecha, el resultado obtenido del laminador. ....	106
Figura 62: Defectos comunes en la deposición de cordones de soldadura superpuestos o contiguos. Fuente: Fig. 5 [51].....	110
Figura 63: Ejemplo de las deformaciones producidas por las contracciones de los cordones de soldadura al enfriar. Fuente: Fig. 4 [52]. ....	110
Figura 64: A la izquierda, se muestra una microestructura martensítica y, a la derecha, un esquema de una microestructura ferrítico-perlítica. Fuente: Fig. 3-4 y Fig. 3-6 de [10]......	112
Figura 65: Esquema de ensayo a tracción simple. Fuente: Fernández G., I. Pág. 14. [58].....	114
Figura 66: Esquema de la geometría de probetas a tracción según norma UNE-EN ISO 6892-1:2017 [54]......	114
Figura 67: Dirección de crecida de las probetas. Fuente: [60]. ....	115
Figura 68: Esquema de la extracción de las probetas tipo Side u On-Edge (pared simple de 156 x 54 mm obtenida mediante la prueba 4 de la anterior experimentación). Esta figura no está a escala. ....	117
Figura 69: Esquema de la extracción de las probetas tipo Vertical o Upright (prisma cuadrangular regular de 35 x 35 x 156 mm obtenido mediante la prueba 5 de la anterior experimentación). Esta figura no está a escala.....	117
Figura 70: Esquema de la obtención de las distintas probetas. ....	118
Figura 71: Esquema resumen del total de experimentaciones y pruebas a realizar. ....	121
Figura 72: Estructura de descomposición del trabajo (WBS). ....	122
Figura 73: Diagrama de Gantt del proyecto.....	126
Figura 74: Grafico circular de los costes finales del estudio (sin incluir costes de fabricación de los componentes diseñados ni de experimentación). ....	127

## Lista de Tablas

Tabla 1: Materiales aplicables a la tecnología de laminación de hojas. Fuente: [17].	32
Tabla 2: Normas internacionales publicadas de forma conjunta por las organizaciones ISO y ASTM en lo que respecta a la fabricación aditiva y agrupadas por campo. Fuente: ISO y ASTM.	36
Tabla 3: Gases protectores a utilizar según el material base a soldar en soldadura GMAW. Fuente: Jeffus, L., 2009. Pág. 228. [22].	42
Tabla 4: Comparativa de los principales procesos de soldadura por arco eléctrico.	45
Tabla 5: Composición del hilo ER-70S-6 según norma AWS A5.18. Fuente: [27].	58
Tabla 6: Clasificación de los electrodos de tungsteno según norma ISO 6848 [28].	59
Tabla 7: Diámetros de electrodos de tungsteno según la intensidad de corriente. Fuente: SMP [29].	60
Tabla 8: Parámetros orientativos en la elección de la copa cerámica para antorcha TIG según diámetro de electrodo y caudal de gas protector. Fuente: Giachino, J. W.; Weeks; 2003. [10].	62
Tabla 9: Tornillería estandarizada del soporte de la antorcha.	66
Tabla 10: Par de apriete de la tornillería utilizada en este estudio. Fuente: norma UNE-17108:1981 [36].	66
Tabla 11: Tornillería del alimentador de hilo.	72
Tabla 12: Parámetros utilizados en soldadura TIG automatizada de aceros. Metal base: Acero Cr-Mo X11CrMo9-1. Material de aportación: ER 80 B8. Fuente: [45].	92
Tabla 13: Parámetros utilizados en tecnología WAAM. Metal base: Ti-6Al-4V de 11 mm de espesor. Material de aportación: hilo AMS 4954. Fuente: [46].	92
Tabla 14: Parámetros de experimentación. Definición de las pruebas experimentales.	93
Tabla 15: Tiempo y consumo de material empleado en la experimentación.	94
Tabla 16: Cálculos globales de tiempo y consumo de material de las tres pruebas y del total (Experimentación 1).	94
Tabla 17: Consumo de gas de protección (Argón) para la realización de la experimentación.	95
Tabla 18: Estimación del consumo de energía eléctrica (Experimentación 1).	95
Tabla 19: Parámetros utilizados para la generación del código G (prueba 1).	101
Tabla 20: Tiempos estimados para la realización de la prueba 1.	102
Tabla 21: Parámetros utilizados para la realización del código G (prueba 2).	102
Tabla 22: Tiempos estimados para la realización de la prueba 2.	103
Tabla 23: Parámetros utilizados en la realización del código G (prueba 3).	104
Tabla 24: Tiempos estimados para la realización de la prueba 3.	104
Tabla 25: Parámetros utilizados en la realización del código G (prueba 4).	105
Tabla 26: Tiempos estimados para la realización de la prueba 4.	105
Tabla 27: Parámetros utilizados en la realización del código G (prueba 5).	107
Tabla 28: Tiempos estimados para la realización de la prueba 5.	107
Tabla 29: Cálculos globales del consumo de gas de protección (Argón) de las cinco pruebas y del total.	107
Tabla 30: Cálculos globales de tiempo y consumo de material de las cinco pruebas y del total.	108
Tabla 31: Estimación del consumo de energía eléctrica (Experimentación 2).	108
Tabla 32: Estimación del consumo de energía eléctrica (Experimentación 2).	109
Tabla 33: Dimensiones recomendadas de una probeta de sección rectangular para ensayos de tracción a temperatura ambiente según norma UNE-EN ISO 6892-1:2017 [54].	115

Tabla 34: Tolerancias en el ancho de la probeta según norma UNE-EN ISO 6892-1:2017 [54].	115
Tabla 35: Requerimientos mínimos de tensión para el material de aportación utilizado (ER-70S-6) según norma AWS A5.18.	120
Tabla 36: Cálculos globales del total de las experimentaciones.	121
Tabla 37: Tareas realizadas con la previsión de las horas de dedicación.	124
Tabla 38: Lista de tareas y situación temporal para su organización en el diagrama de Gantt.	125
Tabla 39: Resumen de los costes finales del estudio.	127
Tabla 40: CO <sub>2</sub> generado en base a la energía eléctrica consumida.	128
Tabla 41: Residuos radioactivos generados en base a la energía eléctrica consumida.	129

## Acrónimos y Siglas

**ADDIMAT:** Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D.

**ASTM:** Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

**AW:** *Arc Welding.*

**AWS:** *American Welding Society.*

**BJ:** *Binder Jetting.*

**CAD:** *Computer Aided Design.*

**CAE:** *Computer Aided Engineering.*

**CAM:** *Computer Aided Manufacturing.*

**CAM-LEM:** *Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials.*

**CBAM:** *Composite Based Additive Manufacturing.*

**CLIP:** *Continuous Liquid Interface Production.*

**CNC:** Control Numérico Computarizado.

**DLP:** *Digital Light Processing.*

**DMLS:** *Direct Metal Laser Sintering.*

**DOD:** *Drop On Demand.*

**DPP:** *Daylight Polymer Printing.*

**EBAM:** *Electron Beam Additive Manufacturing.*

**EBM:** *Electron Beam Melting.*

**EPI:** Equipo de Protección Individual.

**FA:** Fabricación Aditiva. Equivalente a AM, del inglés *Additive Manufacturing.*

**FCAW:** Soldadura por arco con hilo tubular con núcleo de fundente, del inglés *Flux Cored Arc Welding.*

**GMAW:** Soldadura por arco bajo gas protector metálico, del inglés *Gas Metal Arc Welding.* Equivalente a MIG/MAG.

**GTAW:** Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno, del inglés *Gas Tungsten Arc Welding.* Equivalente a TIG.

**ISO:** Organización Internacional para la Estandarización.

**LDW:** *Laser Deposition Welding.*

**LENS:** *Laser Engineering Net Shape.*

**LMD:** *Laser Metal Deposition.*

**LOM:** *Laminated Object Manufacturing.*

**MAG:** *Metal Active Gas.* Equivalente a GMAW.

**MDF:** Modelado por Deposición Fundida. Equivalente a FDM, del inglés *Fused Deposition Modeling.*

**MIG:** *Metal Inert Gas.* Equivalente a GMAW.

**MJ:** *Material Jetting.*

**MMA:** *Manual Metal Arc Welding.* Equivalente a SMAW.

**NPJ:** *NanoParticle Jetting.*

**OFW:** *Oxy-Fuel Welding.*

**PSL:** *Plastic Sheet Lamination.*

**PT:** *Penetrant liquids testing.*

**RT:** *Radiographic testing.*

**SDL:** *Selective Deposition Lamination.*

**SHS:** *Selective Heat Sintering.*

**SLA:** Estereolitografía.

**SLM:** *Selective Laser Melting.*

**SLM:** *Selective Laser Melting.*

**SLOM:** *Selective Lamination Composite Object Manufacturing.*

**SLS:** *Selective Laser Sintering.*

**SMAW:** Soldadura por arco con electrodo metálico revestido, del inglés *Shielded Metal Arc Welding.* Equivalente a MMA.

**TIG:** *Tungsten Inert Gas.* Equivalente a GTAW.

**UAM:** *Ultrasonic Additive Manufacturing.*

**UT:** *Ultrasonic testing.*

**VT:** *Visual testing.*

**WAAM:** *Wire Arc Additive Manufacturing.*

**WBS:** *Work Breakdown Structure.*

**ZAT:** Zona Afectada Térmicamente.



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Objetivo

El objetivo principal de este proyecto es el estudio de la adaptación de un equipo de soldadura por arco eléctrico (AW, del inglés *Arc Welding*), preferiblemente MIG (del inglés *Metal Inert Gas*) o TIG (del inglés *Tungsten Inert Gas*), a una instalación de fabricación aditiva para la creación de probetas o piezas prototipo tridimensionales mediante la técnica de deposición de metal. Esto incluye, el estudio de los parámetros de soldeo y el diseño y adaptación de todos los componentes requeridos para este proceso de fabricación.

### 1.2. Alcance

El alcance del estudio incluye todo aquello relacionado con la adaptación de un equipo de soldadura por arco eléctrico convencional a una instalación de fabricación aditiva. Concretamente, el alcance de este estudio considera los siguientes puntos:

- Estudio y realización de un análisis de los métodos actuales de fabricación aditiva en general y, más concretamente, de los métodos de fabricación aditiva metálica.
- Diseño de la instalación de fabricación aditiva. Ésta se diseña en base a la estructura de una impresora 3D MDF (Modelado por Deposición Fundida o, FDM, del inglés *Fused Deposition Modeling*) readaptándola de la forma más adecuada. Se procura automatizar el proceso de fabricación lo máximo posible.
- Montaje y calibración de la impresora 3D FDM Anet A8.
- Diseño de las protecciones adecuadas para salvaguardar la instalación frente a altas temperaturas, radiación y proyecciones producidas durante el proceso de soldeo.
- Realización de las acciones convenientes en lo que respecta a la seguridad, haciendo hincapié en el proceso de soldadura. Estas acciones incluyen: revisar la normativa vigente, estudiar los diversos Equipos de Protección Individual (EPI) y definir los protocolos de actuación frente a diversas situaciones.
- Realización de un estudio de los distintos métodos de soldadura y de sus parámetros normales de funcionamiento.
- Elección del método de soldadura que se considere más adecuado para la adaptación a proceso de fabricación aditiva.
- Diseño de todos los elementos necesarios para el acople de la antorcha de soldadura y para la alimentación del material de aportación.
- Realización de los planos correspondientes.
- Generación y optimización de las trayectorias del proceso. Valoración del software más adecuado para ello y modificación directa del G-code. Estudiar las modificaciones necesarias a realizar en el código G.



- Realización de planes experimentales que reflejen la correcta adaptación del proceso y que sirvan para calibrar y estimar parámetros del equipo diseñado. Éstos, también, servirán para probar la calidad de las piezas obtenidas mediante la realización de probetas (en caso de que se ejecute el estudio).
- Documentar todo el proceso.

Por otra parte, quedan fuera del estudio los siguientes puntos:

- Análisis de la precisión y repetitividad del proceso de fabricación.
- Obtención de piezas plenamente funcionales.
- Revisión exhaustiva y profunda de la normativa relacionada.
- En la documentación del proyecto no se incluye información que pueda considerarse irrelevante o insignificante.

Debido a la situación actual de confinamiento y cierre de las universidades debido a la expansión del coronavirus COVID-19, no se puede asegurar la fabricación y testeo de los elementos diseñados. Por tanto, los siguientes puntos también quedan fuera del alcance del proyecto:

- Realización de pruebas y validación del proceso. Por tanto, quedan fuera del alcance las actividades de: fabricación, montaje, calibración y ejecución de los planes experimentales diseñados.
- Estudio de viabilidad y comparativa frente a otros procesos de fabricación.
- Ensayo de las probetas obtenidas. Se definen las técnicas de inspección (revisión de defectos, análisis metalográficos y diversos ensayos) en los planes de experimentación, pero éstas no se pueden llevarse a cabo.

### 1.3. Requerimientos

El proceso de soldadura requiere ciertos equipos de coste elevado y con características especiales, es por esto por lo que el proyecto puede experimentar variaciones en la técnica de soldadura utilizada.

En la fase inicial del proyecto ya se ha observado que el equipo de soldadura MIG puede no estar disponible o presentar compleja adaptación. En su defecto, se utilizará un equipo de soldadura TIG realizando aportación externa de material.

También, es necesario el uso de gas de protección durante la soldadura. Las bombonas de gas, para ser suministradas, requieren estar aseguradas y cumplir con la normativa de seguridad vigente. Por tanto, en este aspecto se resta a los procedimientos indicados por la Universidad.

Dentro de los requerimientos podemos incluir, también, el acceso a determinadas normas. Por ejemplo, normas de seguridad de la *Universitat Politècnica de Catalunya* (NSH 217-*Soldadura eléctrica*) y normas internacionales como las relativas a tornillería: UNE-EN ISO 898-1 [34], UNE-EN ISO 3506-1:2010 [35], UNE 17108:1981 [36], DIN-912/ISO-

4762, etcétera; y, otras como: UNE-EN ISO 6520-1:2009 [48] (imperfecciones en uniones soldadas) y UNE-EN ISO 6892-1:2017 [54] (ensayos a tracción), entre otras.

También será necesaria una impresora 3D MDF. Se cuenta con la disponibilidad del modelo Anet A8. Se realizará su montaje y calibración.

La dedicación del proyecto requiere de 24 créditos académicos. Un crédito académico equivale a unas 25-30 horas de dedicación. Por norma general, se exige una dedicación aproximada de 600 horas.

La fecha de entrega es el 30 de junio de 2020.

## **1.4. Justificación**

Las tecnologías de fabricación aditiva y de prototipado rápido están revolucionando el mundo industrial actual. Los avances en este campo son muy numerosos en los últimos años. Ante el surgimiento de nuevas tecnologías de fabricación aditiva que prometen mayores tasas de aporte, mejores acabados, mayor precisión y menor tiempo de fabricación; se quiere aportar un nuevo punto de vista.

Las tecnologías de fabricación aditiva basadas en soldadura por arco eléctrico con un material de aportación en forma de hilo metálico están, actualmente, en plena investigación y auge. Con este estudio, se pretende dar visión a este tipo de tecnología y a las posibilidades que ofrece. Estas tecnologías permiten fabricar piezas complejas de forma más sencilla. De esta forma, se puede evitar la realización de complejos utillajes y herramientas específicos. Las piezas con geometrías complejas, como las piezas con conductos internos y las piezas optimizadas topológicamente, presentan un proceso de fabricación mucho más ágil en entornos de fabricación aditiva.

En este estudio, se quiere realizar una adaptación de una de estas tecnologías a una impresora 3D con el fin de realizar una instalación de bajo coste accesible a toda la población.

## **1.5. Condición de éxito**

La realización del estudio dentro del alcance propuesto y cumpliendo todos los requerimientos expuestos será condición de éxito. Tras el desarrollo teórico y contrastado de todos los puntos descritos y tras el cumplimiento de los objetivos marcados; este estudio será considerado exitoso.

## **1.6. Estructura del documento**

Tras estos primeros apartados introductorios, el documento sigue con el capítulo: “2. *Estado del Arte*”. En dicho capítulo, se introduce el concepto de fabricación aditiva y se muestran las tecnologías o procesos actuales más comunes. También, se muestra la evolución de este tipo de fabricación, algunos de los procesos afines a este estudio y, una pequeña mención al marco normativo actual de este tipo de tecnologías de fabricación. Tras esto, en el capítulo “3. *Métodos de Soldadura*”, se muestran los métodos de soldadura más comunes y afines al estudio. Tras realizar un estudio de cada tecnología de soldadura por arco eléctrico se realiza una comparativa y se define el método de soldadura

escogido para este estudio. En este capítulo, también, se incluye un apartado en el que se definen los posibles riesgos asociados a procesos de soldadura y las medidas de seguridad mínimas necesarias para la realización de este tipo de actividades.

Seguidamente, encontramos el capítulo “4. *Diseño y configuración de la maquinaria*”. En dicho capítulo, se presenta la configuración de todo el equipo. Se muestra el proceso de montaje de la impresora 3D y su calibración. También, se discuten las posibles configuraciones del equipo de soldadura y se muestra el diseño realizado para el soporte de la antorcha y el alimentador del material de aporte. Finalmente, el capítulo termina definiendo las protecciones necesarias a implementar en la máquina.

Posteriormente, en el capítulo “5. *Programación de las trayectorias*” se muestra todo lo que hay que tener en cuenta para programar los movimientos de la máquina y, también, se realizan unos planes de experimentación. Se muestra la metodología a seguir para realizar y programar la máquina, se define la electrónica, el *firmware* y el programa de laminación utilizado. Tras esto, se muestran las modificaciones del código G necesarias para la adaptación del proceso de soldadura y, también, las calibraciones requeridas. Al final del capítulo, se realizan unos planes de experimentación y se expone la forma de realizar el análisis de los resultados obtenidos de dichas experimentaciones. En estos análisis se definen técnicas como la inspección visual de defectos e imperfecciones, el análisis metalográfico y los ensayos a tracción.

A continuación, siguen los capítulos “6. *Planificación y organización*”, “7. *Resumen del presupuesto*” y “8. *Implicaciones medioambientales*”. En dichos capítulos, se expone la planificación del proyecto (descomposición del trabajo, descripción de las tareas y horas necesarias y diagrama de Gantt), un resumen del presupuesto del proyecto y, finalmente, las implicaciones medioambientales asociadas a la ejecución del proyecto.

Finalmente, en el capítulo “9. *Conclusiones*” se hace una discusión de los resultados obtenidos del estudio y se comentan las futuras líneas de trabajo.

En la “10. *Bibliografía*” se encuentran todas las referencias de los documentos consultados para la realización de este estudio.

Además, se presentan documentos anexos en los cuales se aporta documentación adicional. Estos documentos son: *Anexos, Planos y Presupuesto*.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Introducción

Históricamente, con la llegada de la Primera Revolución Industrial, durante la segunda mitad del siglo XVIII, se produjeron una serie de avances tecnológicos que provocaron la sustitución de métodos artesanales y manuales por otros métodos de fabricación industrial en serie y de forma automática. La llegada del telar mecánico, la máquina de vapor, el telégrafo y la invención de la locomotora; marcaron un antes y un después en la industria mundial [1]. Más tarde, a finales del siglo XIX, llegó la Segunda Revolución Industrial acompañada de la Primera Globalización. Las nuevas fuentes de energía, cómo el petróleo y la electricidad, los nuevos materiales, cómo la producción masiva en acero, y los nuevos sistemas de comunicación y transporte [2]; marcaron el conjunto de avances técnicos de esta etapa. Posteriormente, Jeremy Rifkin fue el principal propulsor de la llamada: Tercera Revolución Industrial que fue aprobada formalmente en el parlamento europeo en 2007 [3]. Esta etapa se basaba, según Rifkin, en cinco pilares fundamentales: la transición hacia energías renovables, la transformación de las edificaciones en generadores de energía, las nuevas tecnologías de almacenamiento de energía, el desarrollo de una red eléctrica inteligente y la evolución de los automóviles hacia vehículos eléctricos, híbridos y de pilas de combustible [4].

En la actualidad ha surgido un nuevo concepto, la industria 4.0 [5]. Esta etapa todavía no puede describirse con exactitud, el concepto ha comenzado a impulsarse recientemente y se estima su desarrollo durante la tercera década del siglo XXI. Según muestran sus primeros pasos, devendrá en una revolución de la industria actual. La digitalización e interconexión de la industria son las bases de este movimiento. Aspectos como la inteligencia artificial, el *big data*, el internet de las cosas, los sistemas ciberfísicos, la visión artificial, las nuevas tecnologías de fabricación aditiva, la cultura *maker* y el uso intensivo de la tecnología punta y el internet; son los promovidos por este movimiento y, permiten la optimización y mejora de los procesos productivos.

En la siguiente *Figura 1* podemos observar de forma resumida el conjunto de cambios más importantes que se han producido en la industria.



Figura 1: Desarrollos de la industria. Fuente: [5].

La industria 4.0 es la etapa en la que se enmarca este proyecto y, mediante el cual, se pretende aportar nuevas visiones en el campo de las tecnologías de fabricación aditiva, más concretamente, en lo que podríamos calificar como: deposición de material metálico fundido mediante arco eléctrico. Por otra parte, la cultura *maker*, o lo que es lo mismo, el hazlo tú mismo, tendrá gran influencia en el desarrollo de este proyecto, ya que se utilizarán muchas de las tecnologías adoptadas y empleadas por esta comunidad.

La fabricación aditiva nace con el propósito de mejorar y optimizar los procesos productivos actuales. Actualmente es un sector en crecimiento y en el que se están invirtiendo grandes cantidades de dinero en investigación y desarrollo. Estas tecnologías implican una metodología de fabricación novedosa y, además, muchos de los procesos de fabricación aún no están desarrollados de forma óptima, por lo que son susceptibles a mejoras.

La industria se está adaptando y reinventando a una velocidad de vértigo y el surgimiento de nuevas tecnologías es constante. A lo largo de este capítulo, se definirá lo que se entiende como fabricación aditiva, se verá su evolución y, se presentarán los principales procesos de fabricación aditiva existentes actualmente.

## 2.2. La Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva (FA, o también AM de sus siglas en inglés, *Additive Manufacturing*) según la Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D, bajo las siglas ADDIMAT, se define de la siguiente forma:

*“La Fabricación Aditiva comprende una variedad de procesos basados en añadir material de forma selectiva, formando un objeto mediante la superposición de capas sucesivas de material a partir de un modelo digital.*

*A diferencia de los métodos tradicionales de fabricación se añade el material en lugar de eliminarse.” [6].*

Es decir, puede entenderse la FA como el proceso de fabricación de objetos en tres dimensiones a base de superponer capas de material. Las capas de material son finas secciones transversales del modelo 3D que fue previamente tratado de forma virtual. En términos generales, los procesos básicos de fabricación se pueden dividir en tres: eliminación de material, deformación incremental o aportación de material. En este caso, el principio básico de la FA es la aportación de material allí donde es necesario para generar la pieza. Estos procesos de FA también son conocidos como impresión 3D.

Este tipo de tecnologías ofrecen mejoras en los procesos de fabricación optimizándolos al máximo. Si comparamos esta tecnología con métodos de fabricación tradicionales, son numerosas las ventajas que nos ofrece. Los procesos de FA son más sostenibles ya que prácticamente no generan deshechos. Esto es debido a que el material que se utiliza para la fabricación es destinado, en su mayoría, a la pieza final. Por otra parte, también se eliminan procesos intermedios como son la creación de moldes y utillajes, lo que lo convierte en un proceso más directo, rápido, barato y sostenible.



De forma genérica, la FA permite un menor consumo de materia prima, un menor consumo de energía, la fabricación de piezas de geometría compleja y una reducción del tiempo entre la fase de diseño y la obtención del producto final.

En la siguiente *Figura 2* se puede observar un ejemplo de una pieza fabricada en aluminio AlSi<sub>10</sub>Mg con un grosor de capa de 60 µm y un post proceso de granallado mediante una tecnología similar al SLM, del inglés *Selective Laser Melting*. La pieza es una muestra exhibida en la feria “*Advanced Factories*” de Barcelona celebrada en 2020. La capacidad de estas tecnologías de generar geometrías complejas puede observarse en la fotografía de la izquierda en la cual se ha integrado un código QR a la pieza.



*Figura 2: Jet nozzle aeroespacial fabricado por RENISHAW® mediante su tecnología similar al SLM.*

Los campos de aplicación de la fabricación aditiva son muy diversos. Este tipo de tecnologías han tomado fuerza, sobre todo, en los sectores de la sanidad y el aeroespacial. Es una tecnología con un gran potencial y que se aplica, también, en sectores tan diversos como el automotriz, la joyería, el textil, la construcción, la juguetería, etcétera.

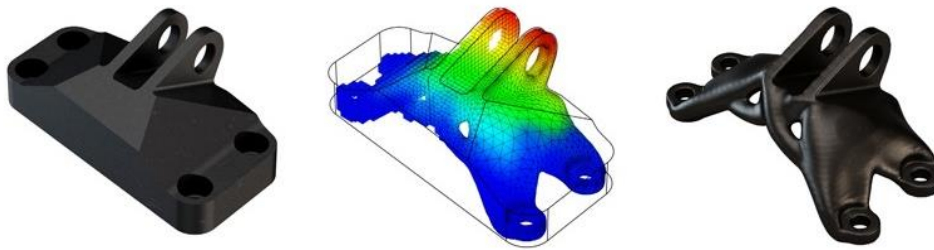
En el sector sanitario tiene especial interés para generar prótesis, implantes e incluso tejidos y órganos (bioimpresión) adaptados a cada uno de los pacientes. En odontología ya es frecuente su uso para la generación de implantes. En otras disciplinas aún se están realizando grandes investigaciones.

En el sector aeronáutico la FA aditiva tiene gran importancia debido a la posibilidad de generar piezas complejas como, por ejemplo, actuadores activos de control de flujo, tal y como muestra el artículo [7]. Al permitir fabricar geometrías difíciles que, en ocasiones, serían incluso imposibles de fabricar mediante métodos de fabricación tradicionales; se facilita la fabricación y obtención de piezas optimizadas topológicamente. La optimización topológica permite un mayor aprovechamiento del material en las piezas y, por tanto, permite disminuir el peso final de la pieza y ahorrar material. Estos dos últimos puntos son claves en el sector aeronáutico, la reducción del peso de las piezas tiene gran impacto en el comportamiento y eficiencia de la aeronave y, el ahorro de material es fundamental cuando se trabaja con superaleaciones y aleaciones ligeras de alto coste.

Estas geometrías complejas son perfectamente asumibles en un entorno de fabricación aditiva. Éste último es uno de los motivos por los que las tecnologías de fabricación aditiva pueden resultar inigualables. Además, ya hay empresas que afirman que el coste

final de las piezas fabricadas mediante FA presenta ventajas frente a métodos de fabricación tradicionales y, el ritmo de producción y la precisión de éstas empiezan a indicar cifras interesantes.

En la siguiente *Figura 3* se puede observar el proceso de optimización topológica anteriormente descrito. Se parte de la pieza original y mediante un análisis de elementos finitos se puede determinar la geometría óptima para las necesidades de la pieza final. Finalmente, se obtienen geometrías, generalmente, más complejas pero que presentan ventajas en cuanto a peso y ahorro de material.



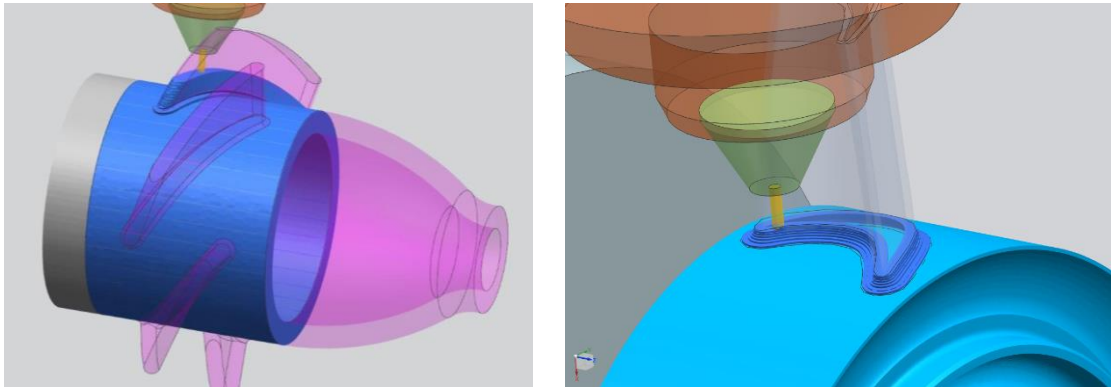
*Figura 3: Proceso de optimización topológica. Fuente: Frustrum [8].*

La tecnología WAAM, del inglés *Wire Arc Additive Manufacturing*, es quizás la tecnología más parecida a la desarrollada en este proyecto. Según *Additive Manufacturing Media* [9] diversas empresas utilizan la tecnología WAAM para la obtención de piezas próximas a la pieza final con el fin de ahorrar material y, por lo tanto, obtener bajos *buy-to-fly* ratios (ratio entre el material de la pieza inicial y la pieza final). Se ha recurrido a la tecnología WAAM debido a que en procesos de fabricación tradicional después de varios procesos de mecanizado que incluyen corte, torneado, fresado y taladrado, hasta el 90% del titanio original se deja como virutas de desecho. Estas virutas están contaminadas con refrigerantes o se mezclan con sustancias que no pueden reciclarse a un coste razonable.

Cabe mencionar que sin los actuales avances tecnológicos en términos de software, computación y tratamiento de datos las tecnologías de fabricación aditiva no existirían. El diseño asistido por ordenador CAD, del inglés *Computer Aided Design*, ha substituido por completo los planos dibujados a mano y ha permitido el diseño y visualización en 3D. Por otra parte, la ingeniería asistida por ordenador CAE, del inglés *Computer Aided Engineering*, permite analizar y simular los diseños realizados y, en algunas ocasiones, este software se incorpora como una extensión o módulos del software CAD. Por último, el software CAM, del inglés *Computer Aided Manufacturing*, permite la gestión de la fabricación, definir la herramienta a utilizar durante el mecanizado, definir las trayectorias y los planos de mecanizado, generar el código de control numérico y simular y supervisar el proceso de fabricación.

El software CAM puede adaptarse a la fabricación aditiva debido a las similitudes con los movimientos de las máquinas de mecanizado. Sin embargo, el proceso de fabricación es opuesto. En un mecanizado se extrae material mientras que en la fabricación aditiva se añade y, por tanto, el cabezal sigue la trayectoria dónde se va a depositar el material. Cabe destacar que en la FA la programación de la trayectoria afecta de forma directa en el resultado final de la pieza obtenida.

Los programas de CAM destinados al mecanizado o a la fabricación aditiva para pequeñas impresoras 3D de termoplástico son abundantes y algunos, incluso, de libre acceso. Sin embargo, el número de programas CAM para fabricación aditiva metálica es reducido y, en ocasiones, adaptado y protegido por cada una de las empresas. Y, además, están en constante cambio y desarrollo. En la siguiente *Figura 4* se puede observar un ejemplo del software CAM aplicado a tecnologías de fabricación aditiva de la mano de Siemens PLM Software.



*Figura 4: Software NX CAM Hybrid Additive Manufacturing. Fuente: Siemens PLM Software.*

### 2.3. Evolución de la fabricación aditiva

Las tecnologías de fabricación aditiva y de prototipado rápido están revolucionando el mundo industrial actual. Aunque muchas de las tecnologías ya eran utilizadas con anterioridad, estos últimos años están irrumpiendo en el mercado de forma revolucionaria.

La fabricación aditiva o procesos similares, como ya se ha expresado anteriormente, no son algo nuevo. Los recargues superficiales mediante soldadura utilizados en la industria como método de reparación de ejes desgastados o ruedas dentadas llevan usándose años atrás (por ejemplo, tal y como se muestra en la Fig. 30-9 de la pág. 310 de [10] donde se recupera una rueda dentada mediante la aportación de latón o, tal y como, expresa el capítulo 31: Recargues Superficiales de la misma referencia [10]). Éstos también pueden considerarse procesos de fabricación aditiva. Lo realmente revolucionario es el uso exclusivo de estas técnicas para producir piezas totalmente funcionales con buenos acabados, precisión y repetitividad.

Inicialmente, esta tipología de fabricación estaba destinada al mundo del prototipaje. Estas tecnologías nacieron con el fin de obtener prototipos con ciertas características, de este modo, las empresas productoras son capaces de ahorrarse la realización de moldes y la ejecución de procesos de fabricación de alto coste en productos que aún están en fase de diseño y que, por lo tanto, son susceptibles a ser modificados. El avance en las tecnologías de fabricación aditiva permitió pasar de utilizar prototipos de diseño y geométricos a servirse de prototipos plenamente funcionales y técnicos.

La obtención de piezas plenamente funcionales con buena precisión geométrica, con una correcta repetitividad en el proceso, con propiedades estructurales adecuadas y con



buenos acabados superficiales; convirtieron una técnica destinada al prototipaje en una tecnología de fabricación adaptable a la industria actual.

La fabricación aditiva surgió por primera vez en el año 1981 con las investigaciones e invenciones de Hideo Kodama. Él fue quien vio, en la utilización de polímeros foto-endurecibles, la oportunidad de generar piezas tridimensionales. Posteriormente, apareció la estereolitografía (SLA) de la mano de Chuck Hull, quién patentó y comercializó dicha tecnología a través de la empresa 3D Systems y, además, creó el formato de archivos STL [12]. Este formato de archivo pertenece al grupo de los archivos CAD, detallan la geometría 3D, pero suprimen información como color, texturas o propiedades físicas.

En 1987 Carl Deckard inventa un nuevo método de FA. La invención consistía en solidificar material en forma de polvo mediante láser para la obtención de piezas. Por tanto, fue el inventor de la tecnología SLS, tecnología que no fue desarrollada hasta años más tarde [13].

En 1989 Scott Crump, junto con su esposa e inventora Lisa Crump, inventó y patentó la tecnología de modelado por deposición fundida (MDF), tecnología que, probablemente, se ha convertido en la más mediática y de fácil implementación en todo el mundo. Más tarde, Crump fue cofundador de la empresa Stratasys, una de las empresas de fabricación aditiva más importantes hoy en día.

A partir del año 2000 estas tecnologías de fabricación aditiva se vuelven populares y son el centro de atención de diversas investigaciones. Se desarrollan nuevas tecnologías, se consiguen imprimir incluso órganos y, en 2004 con la fundación del proyecto RepRap por parte de Adrian Bowyer, se crea una gran comunidad de código abierto con el fin de difundir y hacer llegar a todo el mundo la impresión 3D. La finalización de una patente relativa a la tecnología MDF, abrió las puertas a la expansión de las impresoras 3D hacia los hogares. El abaratamiento de los microcontroladores y la electrónica, la generación de grandes comunidades de código libre y la accesibilidad a software de laminación de forma sencilla; han propiciado la implantación de este tipo de tecnologías en un entorno doméstico que, en cierta forma, se introducen en la sociedad y acaban trasladándose al mundo industrial.

La evolución en lo que respecta a las distintas tecnologías de fabricación aditiva es evidente. También lo es su impacto en la producción. Económicamente hablando, en España la fabricación aditiva alcanza en el mercado la cifra de los 100 millones de euros y registró a finales de 2018 una generación de empleo de entorno al medio millar de personas y, además, las perspectivas de crecimiento son positivas, según ICEX España Exportación e Inversiones [11].

La consultora independiente norteamericana Wohlers presentó un informe en 2018 en el que la fabricación aditiva global registra un crecimiento del 21% situando el mercado entorno a los 6.300 millones de euros. En el siguiente *Figura 5*, se muestra el tamaño del mercado de impresión en 3D y su previsión, según tecnología, en EE. UU. durante el período de 2014-2025 (en millones de dólares). Se prevé que el negocio alcance a nivel global los 16.000 millones de euros en 2021. [11]

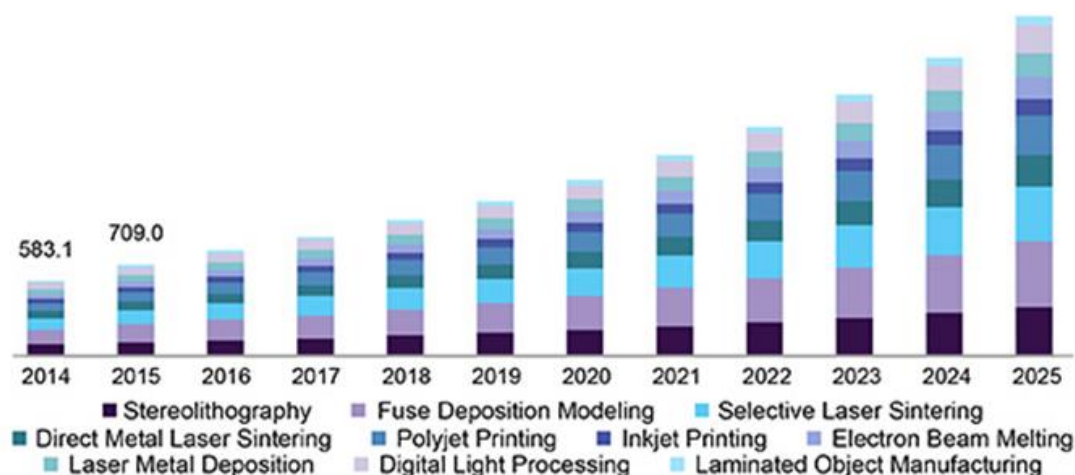


Figura 5: Tamaño del mercado de impresión en 3D, según tecnología, en EE. UU. durante el período de 2014-2025 (en millones de dólares). Fuente: Grandviewresearch. [11]

La evolución, progresión e implantación de las tecnologías de fabricación aditiva es evidente a nivel tecnológico, productivo y económico. En los próximos años se vivirá una remodelación de la industria hacia este tipo de tecnologías predominando la optimización, la rapidez y la sostenibilidad.

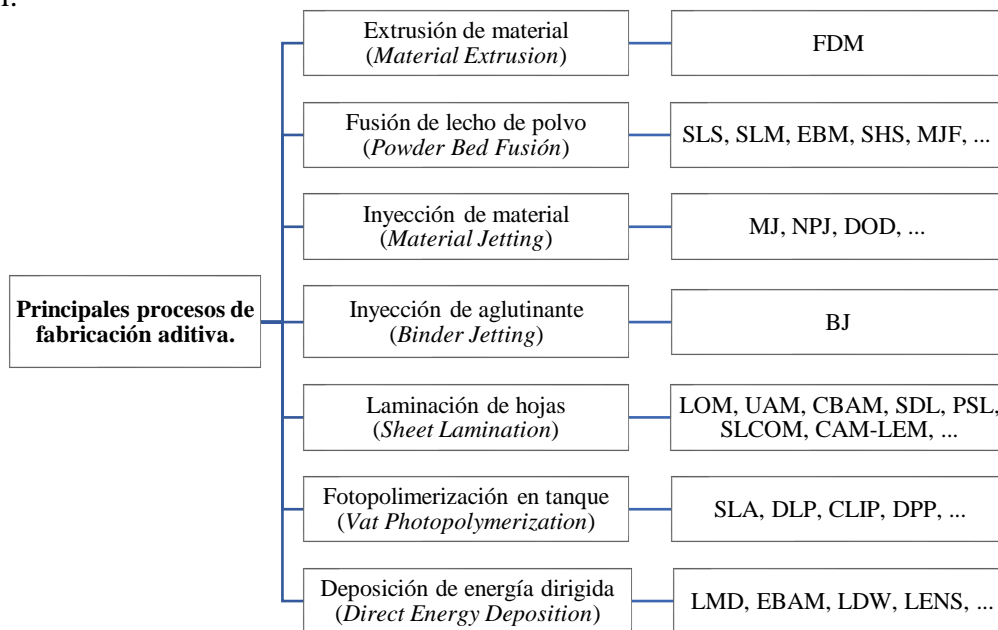
## 2.4. Principales procesos de fabricación aditiva

En este apartado se presentan y describen de forma breve las distintas tecnologías de fabricación aditiva y, al mismo tiempo, se hacen algunas aclaraciones. En ocasiones, existe cierta confusión con los nombres de los distintos procesos productivos. Podemos, por ejemplo, ver designaciones como *SLS*, *EBM*, *SLM*, etcétera. La realidad es que todas estas designaciones forman parte de una misma tecnología de fabricación aditiva, la fusión de lecho en polvo o, en inglés, *Powder bed fusión*. Es cierto que el proceso de fabricación no es idéntico, pero sí su base y tecnología.

En este punto, pueden aparecer confusiones entre unas tecnologías y otras. La existencia de estos múltiples nombres o designaciones es debido, en gran parte, a que distintas empresas dedicadas al sector han ido desarrollando sus propias tecnologías y, a medida que se lanzaban al mercado, eran nombradas según su conveniencia. Una vez en el mercado, se toma como referencia la designación que ha proporcionado la empresa más puntera y referente del sector o la empresa propietaria de dicha tecnología.

Es en este punto donde es necesario llegar a un consenso para no generar confusión. Las organizaciones internacionales deben intervenir para la estandarización de los procesos productivos. En el siguiente apartado “2.5. Marco normativo de la fabricación aditiva” se hace referencia a las normas internacionales existentes para la fabricación aditiva y se hace hincapié en su importancia y evolución.

Dicho esto, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) en conjunto con la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) determinaron que el conjunto de las tecnologías de fabricación aditiva, pueden agruparse en siete tecnologías distintas y, dieron el nombre y terminología de éstas. Estas tecnologías son las mostradas en la siguiente *Figura 6*. En la misma *Figura 6* se puede observar la problemática generada al existir numerosas designaciones no estandarizadas como las mostradas a la derecha del árbol.



*Figura 6: Conjunto de tecnologías de fabricación aditiva según la terminología designada por las organizaciones ISO/ASTM. Fuente: ISO/ASTM.*

Según la Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D, bajo las siglas ADDIMAT, las siete tecnologías de fabricación aditiva pueden describirse de forma concisa de la siguiente forma [6]:

- **Extrusión de material** (*Material Extrusion*): “El material es dispensado selectivamente por un orificio.”
- **Fusión de lecho de polvo** (*Powder Bed Fusión*): “Energía térmica que funde selectivamente regiones de un lecho de polvo.”
- **Inyección de material** (*Material Jetting*): “Gotas de material que son depositadas selectivamente para conformar un objeto.”
- **Inyección de aglutinante** (*Binder Jetting*): “Un adhesivo líquido es depositado selectivamente para unir partículas de polvo.”
- **Laminación de hojas** (*Sheet Lamination*): “Láminas de material son unidas para formar un objeto.”
- **Fotopolimerización en tanque** (*Vat Photopolymerization*): “Un fotopolímero líquido se cura selectivamente mediante la polimerización activa por luz.”
- **Deposición de energía dirigida** (*Direct Energy Deposition*): “Energía térmica focalizada para fundir el material mientras está siendo depositado.”

A continuación, se explica cada una de las distintas tecnologías de forma más detallada.

#### 2.4.1 Extrusión de material

La extrusión de material o, *material extrusion* en inglés, es, probablemente, el método de fabricación aditiva más conocido por todo el mundo. Es ampliamente reconocido por la tecnología FDM, del inglés *Fuse Deposition Modelling*, desarrollada por la empresa Stratasys® y que puede ser fácilmente aplicada a impresoras 3D domésticas de bajo coste.

Esta tipología de tecnología consiste en extruir material fundido a través de una boquilla para depositarlo capa a capa formando las secciones transversales de la pieza. Una vez depositado el material, éste se solidifica y se adhiere a las capas adyacentes. El conjunto de las secciones transversales o, también llamadas capas, forma la pieza final [14]. En la siguiente *Figura 7* se puede ver un esquema de la tecnología de extrusión de material.

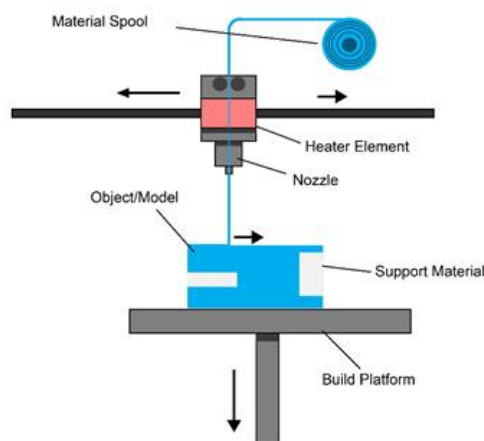


Figura 7: Esquema de la tecnología de extrusión de material. Fuente: [14].

Este tipo de tecnologías ha llegado a los hogares en los últimos años gracias al abaratamiento de los microcontroladores y de todos los elementos que la componen. Entorno a este tipo de tecnología de fabricación aditiva ha surgido una enorme comunidad nombrada *comunidad maker* que pretende acercar estas tecnologías a todo el mundo. Esta comunidad se basa en divulgar todo el contenido desarrollado y en generar software libre accesible a todo quién lo requiera.

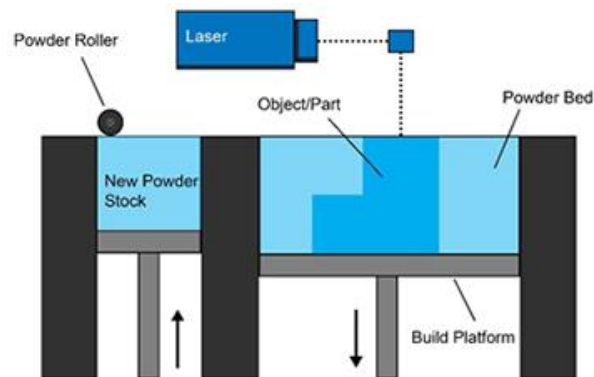
Los materiales utilizados por la tecnología de extrusión de material son polímeros y plásticos. Los más comunes son PLA, ABS, PC, Nylon. También se han realizado algunas pruebas con materiales cerámicos y metales. Por ejemplo, el US community college 3D ha conseguido soldar mediante TIG piezas impresas en acero 316L mediante la tecnología *Bound Metal Additive Manufacturing* (BMAM) [15] que vendría a ser una adaptación del FDM en la que se utilizan filamentos con polvos metálicos y aglutinantes que funden en la impresora 3D. Se obtiene una pieza con cierto material plástico que posteriormente se debe sinterizar. Algo así como una pulvimetalurgia sin necesidad de utilizar prensas o matrices ya que el aglutinante mantiene la forma de la pieza hasta su sinterizado. Son varias las investigaciones abiertas para estudiar nuevas adaptaciones del proceso a distintos materiales.

Las principales ventajas de esta tecnología son: el bajo coste, la obtención de geometrías complejas utilizando material de soporte fácilmente eliminable en el post-procesado, la capacidad de imprimir en materiales accesibles y económicos con buenas propiedades estructurales capaces de generar piezas funcionales y la disponibilidad y sencillez del proceso.

Las principales desventajas de esta tecnología son que el tipo de boquilla utilizado determinará la calidad final y, la precisión, velocidad y acabado superficial son bajos frente a otros procesos.

#### 2.4.2 Fusión de lecho en polvo

La fusión de lecho en polvo o, *powder bed fusión* en inglés, utiliza un láser o un haz de electrones para fundir material en forma de polvo. El polvo, almacenado en una tolva, se distribuye por encima de las capas anteriores mediante un rodillo. Una vez añadida la película de polvo se funde el material sobre las capas anteriores para formar la pieza [14]. En la siguiente *Figura 8* puede verse de forma esquemática este proceso.



*Figura 8: Proceso de fusión de lecho en polvo. Fuente: [14].*

Existen diversas tecnologías que se basan en este proceso, algunas de ellas son: *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), *Electron Beam Melting* (EBM), *Selective Heat Sintering* (SHS), *Selective Laser Melting* (SLM) and *Selective Laser Sintering* (SLS).

Los materiales utilizados en esta tecnología son todos en forma de polvo. Son diversos los materiales que pueden utilizarse, pero comúnmente se utilizan metales y polímeros. Por poner algunos ejemplos, la tecnología SHS se utiliza con plásticos como el Nylon. El DMLS, SLS y SLM pueden utilizarse con acero inoxidable, titanio, aluminio, cobalto cromo y acero. El EBM puede utilizarse con titanio, cobalto cromo, acero inoxidable, aluminio y cobre.

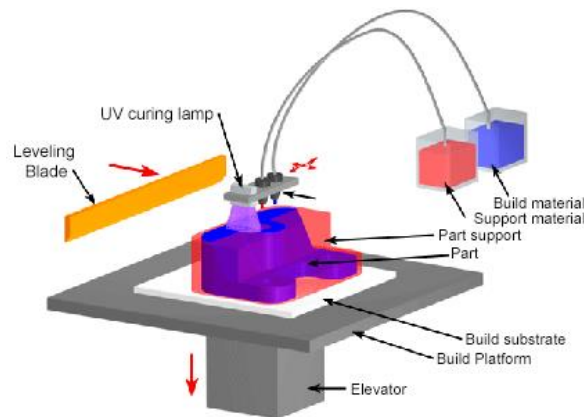
Las principales ventajas de este proceso son que es relativamente barato, es relativamente rápido y rentable, el material en forma de polvo puede servir de soporte y puede utilizarse en diversos materiales.

Las principales desventajas de este proceso son: las limitaciones dimensionales de la pieza, el proceso requiere bastante potencia, debido a las altas temperaturas del proceso las piezas pueden sufrir contracciones y deformaciones y el acabado final dependerá del tamaño del grano de polvo.

### 2.4.3 Inyección de material

La inyección de material o, *Material Jetting* en inglés, deposita material fluido gota a gota sobre una superficie, generalmente ceras y polímeros. Posteriormente se solidifica y se genera la pieza capa a capa. Para solidificar, polimerizar o curar el material fluido se aplica, generalmente, luz ultravioleta UV [14]. Este proceso podría equipararse al de una impresora de inyección de tinta. En la siguiente *Figura 9* puede verse de forma esquemática este proceso.

Algunos de los procesos que utilizan esta tecnología son los llamados: *Material Jetting* (MJ), *NanoParticle Jetting* (NPJ) y *Drop On Demand* (DOD).



*Figura 9: Proceso de inyección de material. Fuente: [14].*

Los materiales que utiliza este proceso son limitados debido a que deben ser líquidos y tener unas propiedades específicas. Generalmente son materiales plásticos y polímeros como el polipropileno, polietileno de alta densidad, poliestireno, polimetilmetacrilato, policarbonato, ABS y HIPS, entre otros.

Las principales ventajas de este proceso son: los buenos acabados superficiales obtenidos, el poco desperdicio de material, es perfecto para crear moldes de fundición a la cera perdida y se pueden realizar múltiples piezas a la vez.

Las principales desventajas de este proceso son: la limitación de los materiales a utilizar y la necesidad frecuente de añadir soportes.

### 2.4.4 Inyección de aglutinante

La inyección de aglutinante o, *binder jetting* en inglés, es una mezcla entre la inyección de material y la fusión de lecho en polvo. Se utilizan dos materiales, por un lado, se utiliza el material base en forma de polvo y, por otro, se utiliza un aglutinante. Éste último, generalmente, es en forma líquida y se utiliza como adhesivo entre las capas de polvo. Se van intercalando capas de aglutinante con capas de polvo para formar las secciones transversales de la pieza [14]. En la siguiente *Figura 10* puede verse de forma esquemática este proceso. En este tipo de tecnología puede ser necesario un procesamiento posterior.



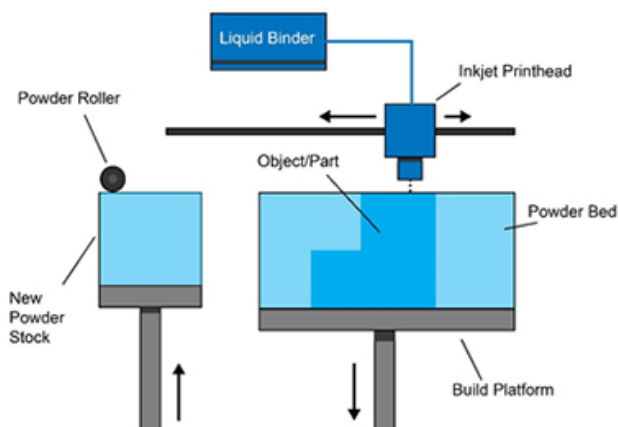


Figura 10: Proceso de inyección de aglutinante. Fuente [14].

Los materiales que se pueden emplear en esta tecnología son muy diversos. Tanto metales como plásticos o, incluso, cerámicas. Entre los más comunes por la parte metálica encontramos el acero inoxidable. Por la parte polimérica, los más comunes son el ABS, la poliamida y el policarbonato. En la parte cerámica, se puede trabajar con vidrio o similares. Los materiales aglutinantes suelen ser resinas capaces de curar o polimerizar fácilmente bajo la incidencia de luz ultravioleta UV o calor.

Las principales ventajas de esta tecnología son: la amplia gama de materiales que permite, la rapidez del proceso (es uno de los procesos de FA más rápido), la pieza es autoportante dentro del lecho de polvo de modo que pueden generarse geometrías complejas y, la mezcla de dos materiales (aglutinante + material base) permite gran cantidad de combinaciones obteniendo piezas con propiedades finales muy distintas.

La principal desventaja de esta tecnología es que las propiedades mecánicas no son funcionales debido a que no se producen transformaciones físicas o químicas en el material. Solamente obtenemos una pieza formada por capas de polvo adheridas entre sí y, a menudo, es necesario un procesamiento posterior para incrementar dichas propiedades, lo que encarece el proceso y agrega tiempo de fabricación.

#### 2.4.5 Laminación de hojas

La laminación de hojas o, *sheet lamination* en inglés, consiste en superponer material en forma de láminas u hojas. Estas hojas forman las capas de la pieza y, previamente cortadas con la forma necesaria, pueden unirse entre sí mediante diversas técnicas. La unión de todas ellas genera la pieza. Se puede observar esquemáticamente el proceso de laminación de hojas en la siguiente Figura 11. Existen diversos procesos, los más comunes son: el *Laminated Object Manufacturing* (LOM) que se basa en unir láminas de papel impregnadas en un adhesivo que se activa mediante calor y/o presión y, el proceso *Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM) que utiliza láminas de metal que se unen mediante ultrasonidos [17]. Este último proceso, generalmente, precisa de un posterior mecanizado.

Existen otros procesos dependiendo del material a utilizar: el *Selective Lamination Composite Object Manufacturing* (SLCOM), el *Plastic Sheet Lamination* (PSL), el *Computer-Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials* (CAM-LEM), el *Selective Deposition Lamination* (SDL) y el *Composite Based Additive Manufacturing* (CBAM), entre otros.

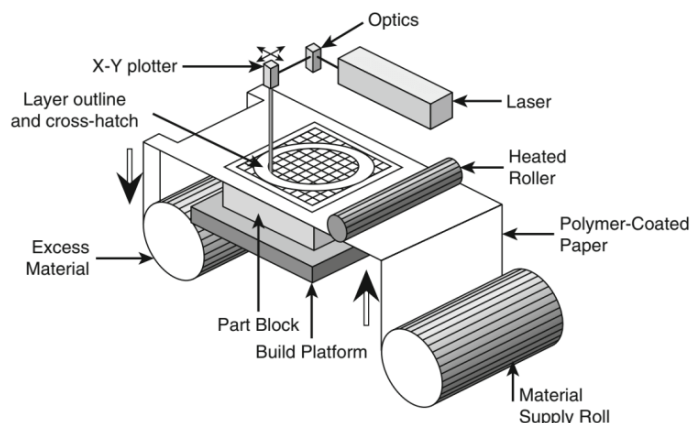


Figura 11: Proceso de laminación de hojas. Fuente: [17].

Gran variedad de materiales pueden trabajarse mediante esta tecnología. Normalmente, cualquier material capaz de conformarse en forma de láminas es apto para esta tecnología. Uno de los más comunes y el primero en utilizarse fue el papel. De todas formas, esta tecnología permite aplicarse a metales, materiales compuestos, plásticos, cerámicas, etcétera. En ocasiones, hasta se intercalan láminas de distintos materiales para conseguir determinadas propiedades. A continuación, en la *Tabla 1* se muestran los materiales utilizables clasificados mediante el proceso que los aplica.

Las principales ventajas de este proceso son: el bajo coste, la facilidad de manejo del material, la posibilidad de trabajar con más de un material a la vez y la velocidad del proceso debido a que las piezas o capas solamente deben ser cortadas por el contorno.

Las principales desventajas son: la necesidad de realizar un post procesado, la resistencia y la integridad de las piezas dependen en gran medida del adhesivo o método de unión utilizado y las imperfecciones en la lámina pueden provocar porosidad o deficiencia en la unión entre láminas pudiendo afectar en las propiedades de la pieza.

Materiales aplicables a la tecnología de laminación de hojas	
Proceso	Materiales
LOM	Papel.
UAM	Gran cantidad de materiales. De forma general, todos aquellos que puedan ser soldados mediante ultrasonidos, generalmente, metales.
PSL	Polímeros.
SLCOM	Fibra de carbono, fibra de vidrio, fibra de aramida (p.ej. kevlar) y PBO (p.ej. zylon).
CAM-LEM	Gran variedad de cerámicas, alúmina, zirconia, alúmina endurecida con zirconia (ZTA) y sílice.
SDL	Papel.
CBAM	Tejidos de fibra fusionados con una matriz termoplástica. Fibra de carbono combinada con Nylon 12, fibra de vidrio con Nylon 12 y fibra de vidrio con polieterecetona (PEEK).

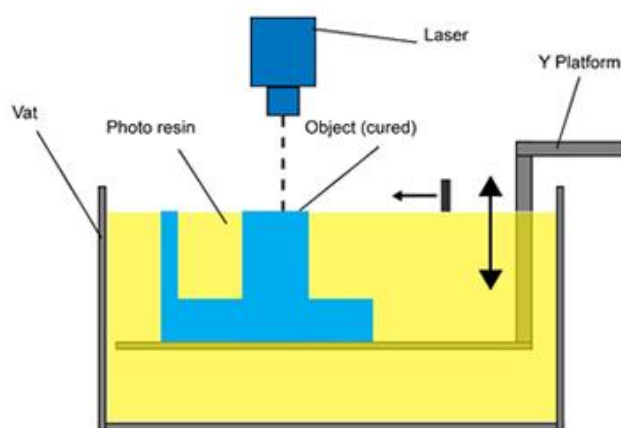
Tabla 1: Materiales aplicables a la tecnología de laminación de hojas. Fuente: [17].



#### 2.4.6 Fotopolimerización en tanque

La fotopolimerización en tanque o, *vat photopolymerization* en inglés, es un proceso que se basa en utilizar un tanque de resina o polímero fotosensible para que mediante luz ultravioleta UV o láser se polimerice o cure selectivamente la superficie del fluido. Tras polimerizar la capa superficial del fluido, la plataforma desciende y se van creando mediante la repetitividad del proceso las capas o secciones transversales de la pieza [14]. En la siguiente *Figura 12* puede verse de forma esquemática este proceso

Este tipo de proceso es comúnmente conocido bajo el término de estereolitografía o SLA, tecnología patentada por Chuck Hull en 1986. Existen otras tecnologías como la *Digital Light Processing* (DLP), la *Continuous Liquid Interface Production* (CLIP), o la *Daylight Polymer Printing* (DPP).



*Figura 12: Proceso de fotopolimerización en tanque. Fuente: [14].*

Los materiales utilizados son plásticos y polímeros. El número de materiales aptos es bastante reducido, se utilizan polímeros o resinas fotosensibles.

Las principales ventajas de este proceso son: el buen acabado superficial y la gran precisión geométrica obtenida, la rapidez del proceso y, cada vez más, la posibilidad de obtener piezas de tamaños considerables.

Las principales desventajas son: el elevado coste del material base y la limitación en el uso único de resinas fotosensibles, la necesidad de implementar soportes y, por tanto, la inversión de tiempo en post procesos, el necesario post proceso para la mejora de las cualidades estructurales y la eliminación de defectos en la pieza.

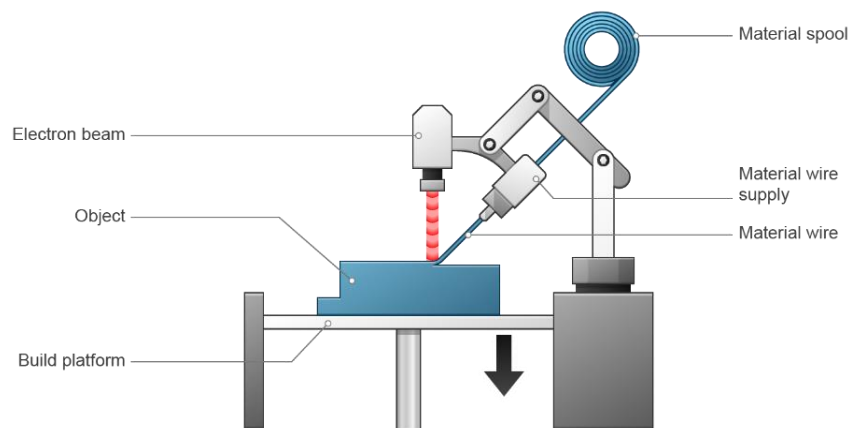
#### 2.4.7 Deposición de energía dirigida

La deposición de energía dirigida o, *direct energy deposition* en inglés, consiste en generar la pieza fundiendo material directamente encima del lugar de su deposición. Esta tecnología aplica localmente y de forma dirigida energía, ya sea mediante un haz de electrones, un láser o, incluso, una antorcha TIG, al material base y crea un baño de fusión. Al mismo tiempo, funde el material de aporte en forma de hilo o de polvo. Al desplazarse el cabezal, éste deja atrás el material aportado y, éste solidifica creando una nueva capa. Al repetir el proceso encima de la capa anterior se genera la pieza

tridimensional [16]. El proceso es similar al proceso de extrusión de material. En la siguiente *Figura 13* se puede observar de forma esquemática el proceso.

Esta tipología de tecnología se utiliza tanto para la creación de piezas nuevas como para la reparación de piezas (los nombrados recargues superficiales). Esta tecnología es capaz de obtener gran maniobrabilidad de modo que, el cabezal puede acoplarse a máquinas CNC (Control Numérico Computarizado) de 5 ejes, brazos robóticos, etcétera. El acoplamiento a una máquina CNC permite construir la pieza y realizar su post proceso y mecanizado en una misma máquina.

Dentro de este grupo de tecnologías encontramos denominaciones del tipo: *Laser Metal Deposition* (LMD), *Laser Engineering Net Shape* (LENS), *Electron Beam Additive Manufacturing* (EBAM), *Laser Deposition Welding* (LDW), entre otros.



*Figura 13: Proceso de deposición de energía dirigida. Fuente: [16].*

Los materiales utilizados son, generalmente, metales en forma de hilo o polvo. Los más comunes son: aceros, aleaciones de aluminio, aleaciones de níquel, cobalto cromo y titanio.

Las principales ventajas de esta tecnología son: la posibilidad de utilización como método de reparación, presenta tasas de aporte mayores que otras tecnologías, por tanto, suele ser más rápida (en comparación a la fusión de lecho en polvo) y se pueden generar piezas de mayor tamaño. En caso de necesitar una atmósfera protectora, se puede canalizar el gas de protección a la zona del baño de fusión en lugar de generar la atmósfera protectora en toda la cámara o volumen de trabajo.

Las principales desventajas de esta tecnología son: la posible dificultad de generar geometrías complejas y la obtención de un mal acabado superficial que requiere de un posterior mecanizado.

## 2.5. Marco normativo de la fabricación aditiva

Poco a poco se va dando nombre a las distintas tecnologías de fabricación aditiva y se está empezando a crear un marco normativo. El aumento de la productividad de las tecnologías de FA ha estimulado a las factorías a aumentar la eficiencia, la calidad y la precisión de los procesos y con ello, las normas. Las normativas son importantes y existen para garantizar y homogeneizar unos estándares de calidad y seguridad, facilitar el comercio internacional, reducir costes, aumentar la efectividad, establecer una terminología y definir las formas de proceder ante ensayos, muestreos, etcétera.

En ocasiones, se ha pretendido adaptar la normativa actual a procesos de FA, pero en la mayoría de las situaciones no es aplicable, ya que se presentan situaciones que no existen en las tecnologías existentes hasta el momento. En la FA pueden darse fenómenos como la anisotropía en las propiedades de la pieza, la influencia de los parámetros de fabricación y la importancia en la orientación durante la deposición de material; que hacen no aplicables las normas actuales. Estas son las razones por las que, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) en conjunto con la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) están trabajando y publicando un conjunto de normas y estándares para estas tecnologías. Las asociaciones a nivel nacional, como pueden ser AENOR, AFNOR, VDI/DIN, también están aportando sus esfuerzos a la estandarización de este sector.

La estandarización es un desafío que se debe afrontar y que conlleva un largo proceso. Por poner algunos ejemplos, las primeras normas relativas a la fabricación aditiva datan de 2013 y son, por ejemplo, la ISO/ASTM 52921:2013. Las siguientes normas de fabricación aditiva datan del año 2015 y son: la ISO/ASTM 52900:2015 que define principios generales y terminología [18][19].

En 2017 surgen nuevas normas al respecto como la ISO/ASTM 52901:2017 que define los requisitos para la compra de piezas fabricadas mediante FA. En 2018 y 2019 empiezan a surgir las primeras normas de diseño de FA, como la ISO/ASTM 52911-1:2019 que trata la FA de metales mediante cama de polvo y fusión laser.

A finales del año 2019 surge la norma intersectorial DIN SPEC 17071 que busca establecer los requisitos para garantizar la calidad de las piezas fabricadas y que es la precursora para la creación de una norma internacional ISO/ASTM, según [20]. No es hasta este mismo año, el año 2020, que se publica la norma ISO/ASTM 52915:2020 que trata sobre los formatos de los archivos (AMF).

Actualmente, hay distintas normas en desarrollo. Como puede observarse, el marco normativo está en plena evolución. Esto es un claro indicativo de la importancia que están tomando las técnicas de fabricación aditiva y de la necesidad de definir las reglas del juego.

En la siguiente *Tabla 2* se muestran las normas internacionales publicadas de forma conjunta por las organizaciones ISO y ASTM en lo que respecta a la fabricación aditiva y agrupadas por campo. De forma individual se han publicado más normas, en la *Tabla 2* únicamente se muestran las que se han publicado de forma conjunta.

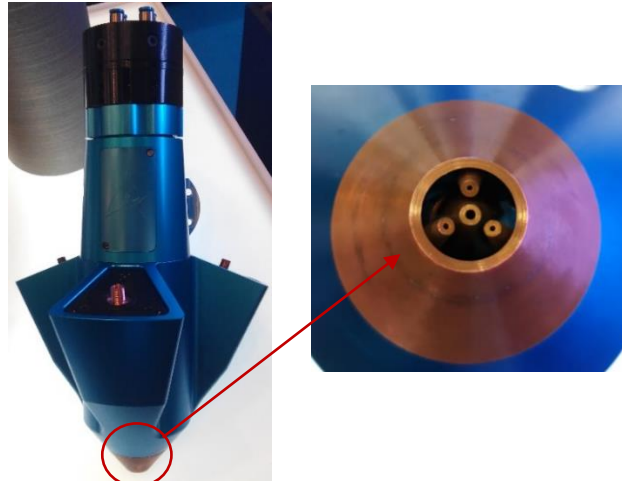
Normas internacionales Fabricación Aditiva		
Campo	Designación	Título
Terminología	ISO/ASTM 52921:2013	Standard terminology for additive manufacturing - Coordinate systems and test methodologies.
Terminología	ISO/ASTM 52900:2015	Additive manufacturing - General principles – Terminology.
Diseño	ISO/ASTM 52910:2018	Additive manufacturing - Design - Requirements, guidelines and recommendations.
Diseño	ISO/ASTM 52911-1:2019	Additive manufacturing - Design - Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals.
Diseño	ISO/ASTM 52911-2:2019	Additive manufacturing - Design - Part 2: Laser-based powder bed fusion of polymers.
Diseño	ISO/ASTM 52915:2020	Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2.
Materiales y procesos	ISO/ASTM 52901:2017	Additive manufacturing - General principles - Requirements for purchased AM parts.
Materiales y procesos	ISO/ASTM 52904:2019	Additive manufacturing - Process characteristics and performance - Practice for metal powder bed fusion process to meet critical applications.
Métodos de ensayo (Test)	ISO/ASTM 52902:2019	Additive manufacturing - Test artifacts - Geometric capability assessment of additive manufacturing systems.
Métodos de ensayo (Test)	ISO/ASTM 52907:2019	Additive manufacturing - Feedstock materials - Methods to characterize metal powders.

Tabla 2: Normas internacionales publicadas de forma conjunta por las organizaciones ISO y ASTM en lo que respecta a la fabricación aditiva y agrupadas por campo. Fuente: ISO y ASTM.

## 2.6. Procesos afines al proyecto

En este apartado se van a mostrar un par de ejemplos existentes en el mercado de procesos afines o similares al que se va a desarrollar en este proyecto. Ambos, se podrían incluir en el grupo de las tecnologías de deposición de energía dirigida presentado, anteriormente, en el apartado “2.4. Principales procesos de fabricación aditiva”.

Uno de los procesos que se encuentran actualmente en el mercado es, por ejemplo, las máquinas Meltio desarrolladas por Sicnova®. Esta empresa ha desarrollado un cabezal multi-láser que permite procesar hilo y polvo metálico (tecnología LMD). En la siguiente *Figura 14* se puede observar dicho cabezal mostrado durante la feria “Advanced Factories” de Barcelona celebrada en 2020. El acabado superficial de las piezas realizadas requiere un posterior mecanizado, es por esto, que Meltio es capaz de incorporarse en centros de mecanizado con el fin de producir piezas correctamente terminadas.



*Figura 14: Cabezal Meltio desarrollado por Sicnova®. A la derecha se pueden observar detalles del cabezal.*

En la siguiente *Figura 15*. Se puede observar la terminación de la pieza realizada con la tecnología de Sicnova® antes (parte inferior) y después (parte superior) de su mecanizado. La pieza es una muestra exhibida en la feria “*Advanced Factories*” de Barcelona celebrada en 2020



*Figura 15: Pieza realizada mediante la tecnología Meltio de Sicnova® antes y después de mecanizar.*

Otra de las tecnologías que destacar es la tecnología WAAM (del inglés *Wire Arc Additive Manufacturing*) desarrollada por la empresa Addilan. Esta tecnología es lo más próximo al proyecto a desarrollar. Se funde hilo metálico mediante técnicas de soldadura por arco eléctrico y se genera un cordón de soldadura, solapando cordones se generan capas y el conjunto de capas forma la pieza final. [21]

Las principales ventajas de esta tecnología son, según Addilan [21]: La mayor tasa de aporte, la posibilidad de fabricar piezas y preformas de mayor tamaño, el menor consumo de materia prima, el menor consumo de energía y la reducción de tiempo entre la fase de diseño y la obtención del producto final.

### 3. MÉTODOS DE SOLDADURA

#### 3.1. Introducción

A lo largo de este capítulo se explica de forma breve qué es la soldadura y se muestran algunos de los procesos de soldadura más extendidos. La comparativa entre los distintos procesos permitirá identificar cuál de éstos puede resultar más adecuado para el desarrollo de este proyecto.

La soldadura es definida por la *American Welding Society (AWS)*, según la pág. 5 de la referencia [22], de la siguiente forma:

*“La soldadura es el proceso de unión que produce la coalescencia (fusión o unión de la estructura de granos de los materiales que se están soldando) de materiales calentándolos a la temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión y con o sin el uso de material de aportación.”* [22]

De forma simple y resumida, la soldadura es un proceso de unión de materiales, generalmente metales, de forma fiable, eficiente y económica. Las primeras técnicas de soldadura datan de la edad de bronce y de la edad de hierro. Claro está que nada tienen que ver con las tecnologías actuales.

Las primeras formas de unir metales consistían en juntar diversas piezas separadas y verter metal fundido en la zona de unión con el fin de obtener una sola pieza. En la edad media se introdujo la soldadura por fragua que consistía en golpear y calentar el metal hasta su unión. Los siguientes métodos de soldadura se basaban en el uso de termita y, posteriormente, acetileno. Los métodos de soldadura tal y como los conocemos hoy en día se desarrollaron entre los siglos XIX y XX. El descubrimiento del arco eléctrico y la corriente alterna intervinieron en gran medida en su desarrollo.

Durante la Primera Guerra Mundial existió un gran repunte y uso de la soldadura. Posteriormente, hubo avances en lo que respecta a la soldadura automática y en la protección del proceso de soldadura mediante gas. Estos avances permitieron soldaduras más fuertes y resistentes debido a la menor porosidad del cordón. Los descubrimientos realizados hasta el momento fueron la base para el desarrollo e implantación de la soldadura por arco durante la Segunda Guerra Mundial.

A lo largo del siglo XX, se desarrollaron diversas tecnologías de soldadura. Entre ellas, la soldadura por arco sumergido, la soldadura por arco metálico con gas de protección y, posteriormente, la soldadura de arco de plasma, la soldadura por rayo de electrones y la soldadura láser, entre otras.

Hoy en día, son muchas las técnicas de soldadura conocidas y aplicadas. De hecho, en la siguiente *Figura 16* se enumeran 67 procesos de soldadura clasificados por la *American Welding Society*. Los distintos procesos se diferencian, principalmente, en el modo en el que se aplica el calor o la presión, o ambas, y en el tipo de equipamiento utilizado.

La soldadura con oxiacetileno (OFW, del inglés *Oxy-Fuel Welding*) juntamente con la soldadura por arco (AW, del inglés *Arc Welding*) y la soldadura fuerte (B, del inglés *Brazing*) son algunos de los procesos de soldadura más comunes y utilizados.



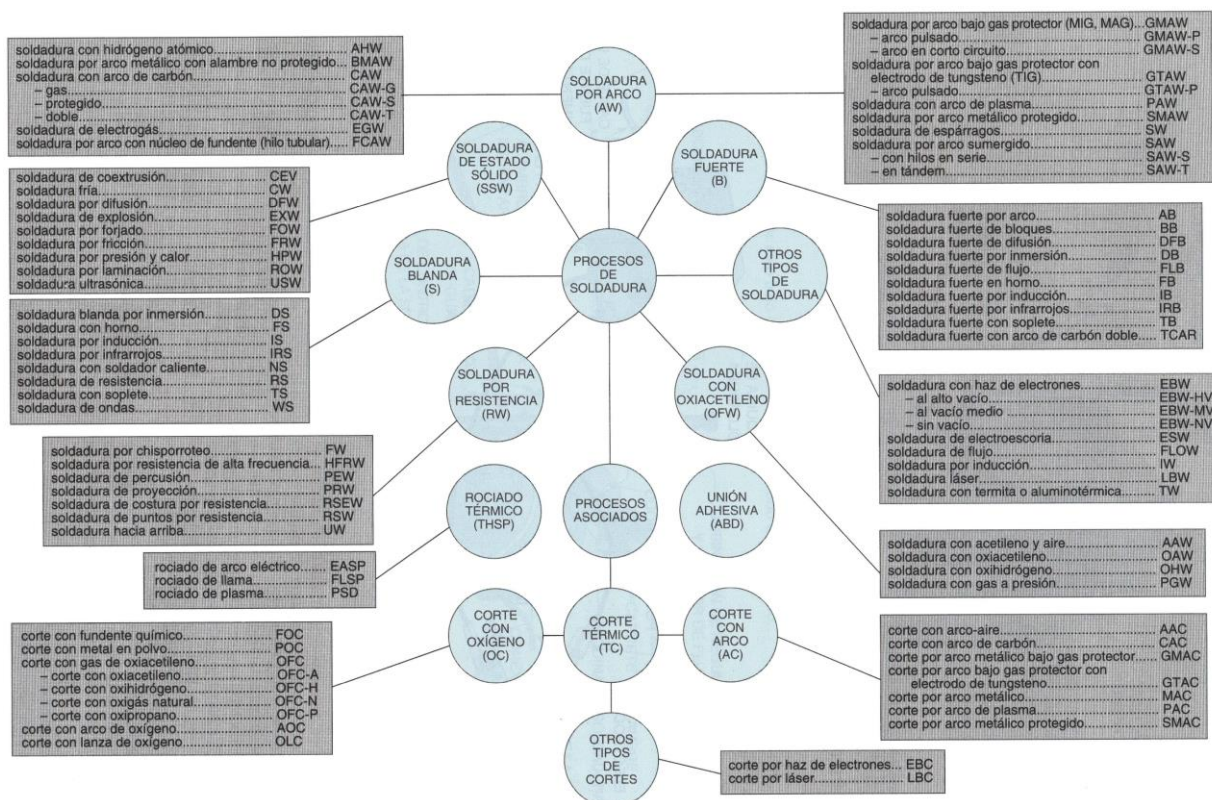


Figura 16: Procesos de soldadura y técnicas afines. Fuente: American Welding Society. Jeffus, L., 2009. Pág. 9, Tabla 1-1 de [22].

Existen, también, procesos de soldadura más avanzados basados en láser y haz de electrones. Estos últimos suelen requerir de equipamiento avanzado y de alto coste.

Cada uno de los procesos tiene sus ventajas y sus inconvenientes. En cualquier caso, será necesaria una valoración para la correcta elección del proceso de unión. Se considera que para el desarrollo de este proyecto los procesos de soldadura basados en soldadura por arco son los más adecuados. Dentro del grupo de la soldadura por arco se pueden destacar cuatro procesos [22]:

- Soldadura por arco con electrodo metálico revestido (SMAW, del inglés *Shielded Metal Arc Welding*), también, conocida como soldadura MMA, del inglés *Manual Metal Arc Welding* o, más comúnmente como soldadura con electrodo o varilla.
- Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno (GTAW, del inglés *Gas Tungsten Arc Welding*) o, también, conocida como TIG, del inglés *Tungsten Inert Gas*.
- Soldadura por arco bajo gas protector metálico (GMAW, del inglés *Gas Metal Arc Welding*) o, también, conocida como MIG/MAG, del inglés *Metal Inert Gas* o *Metal Active Gas*.
- Soldadura por arco con hilo tubular con núcleo de fundente (FCAW, del inglés *Flux Cored Arc Welding*).

Estos procesos de soldadura serán brevemente descritos a continuación para proceder a realizar la correcta elección del método de soldadura.

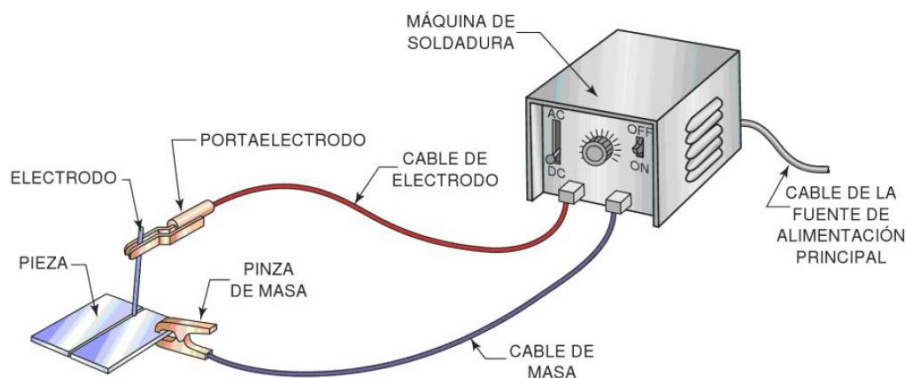
Los métodos de aplicación de la soldadura, también, pueden clasificarse según el grado de automatización del proceso. De menor a mayor grado de automatización: manual, semiautomático, máquina, automático y automatizado, según [22].

### 3.2. Soldadura SMAW

La soldadura por arco con electrodo metálico revestido (SMAW, del inglés *Shielded Metal Arc Welding*), también, conocida como soldadura MMA, del inglés *Manual Metal Arc Welding* o, más comúnmente como soldadura con electrodo o varilla; es uno de los procesos de soldadura más habituales y usados. Esto es debido a su bajo coste de operación y de equipamiento, la facilidad del proceso, la rapidez, la facilidad de transporte y, la obtención de soldaduras fiables y seguras, aunque mejorables.

El calor es generado mediante un arco eléctrico entre el material base y el electrodo metálico recubierto. Los electrodos son consumibles (cumplen la función de material de aporte) y están recubiertos por fundente que protege la soldadura frente a oxidaciones. El fundente se funde junto al metal y crea la atmosfera adecuada para la soldadura, también, es el responsable de generar la escoria y estabilizar el arco. El cebado del arco puede realizarse mediante golpeteo o raspado.

El equipo de soldadura es simple. Consta de una pinza de masa y de una pinza porta-electrodos, en la cual se sujeta el electrodo consumible. Cuando el electrodo está conectado al polo negativo y la masa o pieza a soldar en el polo positivo se habla de polaridad negativa o directa. Si, por el contrario, el electrodo está conectado al positivo y la masa en el negativo, se habla de polaridad positiva o inversa. Cuando se suelda con corriente alterna no tiene sentido hablar de polaridad [10]. Dependiendo del tipo de soldadura a realizar interesará un tipo de polaridad u otro, así como, un tipo de corriente u otro. En la siguiente *Figura 17* se muestra dicho equipo.



*Figura 17: Equipo de soldadura SMAW. Fuente: Jeffus, L., 2009. Pág. 10. [22].*

Este tipo de soldadura es muy versátil y puede ser utilizado en gran variedad de metales. Generalmente, se utiliza para soldar aceros, aunque, también, permite soldar fundiciones de hierro y metales no férricos (aluminio, cobre, latón, etcétera). El tipo de material a



soldar determinará, en gran medida, el electrodo a utilizar. Podemos clasificar los electrodos en 5 familias distintas: electrodos para aceros ordinarios, para aceros de alto contenido en carbono, para aceros especiales y aleados, para fundición de hierro y para materiales no féreos. La designación de los electrodos es la siguiente E-XXYZ. La E marca que el electrodo es válido para soldeo por arco. Las cifras XX marcan la resistencia a la tracción mínima del metal depositado, en miles de libras por pulgada cuadrada (psi). La cifra Y nos indica la posición de soldeo. Finalmente, la cifra Z nos indica características especiales del electrodo como el revestimiento, calidad, poder de penetración o características eléctricas [10].

### 3.3. Soldadura GTAW

La soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno (GTAW, del inglés *Gas Tungsten Arc Welding*) o, también, conocida como TIG, del inglés *Tungsten Inert Gas*, tiene la peculiaridad de utilizar un electrodo de tungsteno no consumible. Genera soldaduras muy limpias y de alta calidad debido a la generación de una atmosfera inerte durante el proceso de soldeo. Puede automatizarse el proceso de soldadura. Además, es aplicable a un gran número de metales y facilita el soldeo de metales no ferrosos. Se avanza que este será el método escogido para este proyecto, de modo que, más adelante se definirá el proceso en más detalle.

Puede realizarse la soldadura con o sin material de aportación. Es necesario el uso de un gas de protección durante el proceso. Generalmente, se utiliza argón, helio o mezclas entre ellos e hidrogeno. Al ser necesario el uso de gas de protección, resulta un proceso más costoso que, por ejemplo, la soldadura SMAW. No solo es necesario el gas de protección, también, se debe disponer del equipo e instalación correspondiente (tuberías, bombonas, manómetros, elementos de protección, etcétera).

El equipo de soldadura está compuesto, en rasgos generales, por la pinza de masa, la antorcha de soldadura, el gas y la máquina en sí. En la siguiente *Figura 18* puede observarse el equipo necesario para este tipo de soldadura.

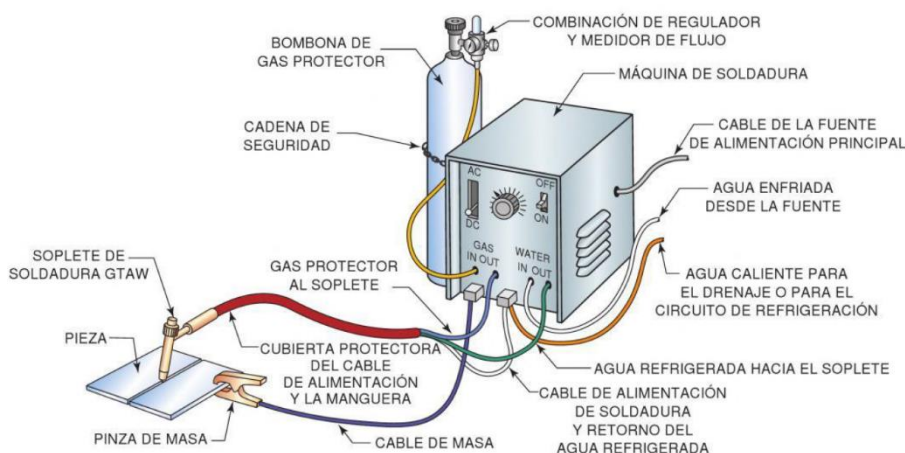


Figura 18: Equipo de soldadura GTAW. Fuente: Jeffus, L., 2009. Pág. 11. [22].

### 3.4. Soldadura GMAW

La soldadura por arco bajo gas protector metálico (GMAW, del inglés *Gas Metal Arc Welding*) o, también, conocida como MIG/MAG, del inglés *Metal Inert Gas* o *Metal Active Gas*, es un tipo de soldadura semiautomática. El material de aportación tiene forma de hilo y se aporta de forma automática mediante unos rodillos incluidos en la máquina. Este material de aportación cumple la función de electrodo consumible. Esta técnica de soldadura es versátil, rápida, cómoda y económica. Destaca por la alta velocidad de soldadura y la limpieza obtenida en los cordones. Además, el proceso de soldeo puede automatizarse fácilmente.

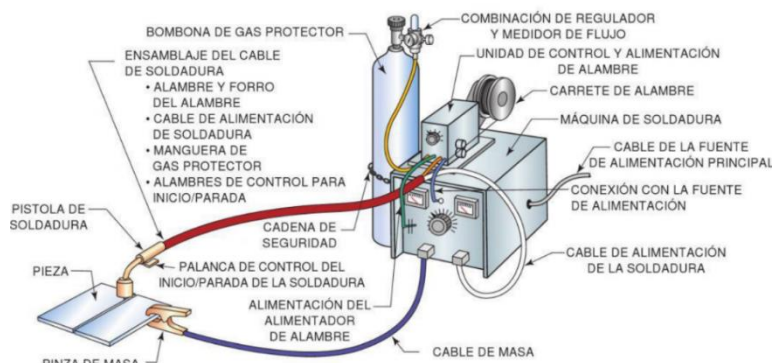
La propia máquina gestiona la velocidad del hilo dependiendo de las características eléctricas introducidas. De todos modos, es posible variar la velocidad del hilo de forma manual. Este tipo de soldadura también requiere de gas de protección. Existen dos variantes dependiendo del gas de protección a utilizar. Si el gas es inerte (soldadura MIG), éste no interviene en la soldadura, sólo la protege, sin embargo, si el gas es activo (soldadura MAG), el gas sigue protegiendo a la soldadura, pero interviene termodinámicamente en la soldadura. El principal inconveniente de utilizar gases activos es que se alcanzan mayores temperaturas y se producen mayores proyecciones.

La elección de un tipo de gas u otro no es arbitraria. Dependiendo del material a soldar se utilizará uno u otro. Para soldar aluminio se utiliza gas inerte como el argón o el helio. Para soldar aceros inoxidable se utiliza argón mezclado con CO<sub>2</sub> y helio o argón con oxígeno, por tanto, gas activo. Para soldar aceros al carbono se utiliza CO<sub>2</sub>, argón con CO<sub>2</sub> o argón con oxígeno, por tanto, gas activo. En la siguiente *Tabla 3* se detalla que gas utilizar según el material base a soldar.

Gases protectores y metal base para soldadura GMAW		
Metal Base	Gas protector	Reacción Química
Aluminio	Argón	Inerte
	Argón + Helio	Inerte
Cobre y aleaciones de cobre	Argón	Inerte
	Argón + Helio	Inerte
Magnesio	Argón	Inerte
	Argón + Helio	Inerte
Níquel y aleaciones de níquel	Argón	Inerte
	Argón + Helio	Inerte
Acero al carbono	Argón + Oxígeno	Levemente oxidante
	Argón + CO <sub>2</sub>	Oxidante
	CO <sub>2</sub>	Oxidante
Acero baja aleación	Argón + Oxígeno	Levemente oxidante
	Argón + helio + CO <sub>2</sub>	Levemente oxidante
	Argón + CO <sub>2</sub>	Oxidante
Acero inoxidable	Argón + Oxígeno	Levemente oxidante
	Argón + helio + CO <sub>2</sub>	Levemente oxidante
Titanio	Argón	Inerte

*Tabla 3: Gases protectores a utilizar según el material base a soldar en soldadura GMAW. Fuente: Jeffus, L.,2009. Pág. 228. [22].*

El equipo de soldadura está compuesto por la pinza de masa, la antorcha de soldadura (a través de la cual, fluyen el gas y el material de aportación), el gas de protección, el equipo en sí y, los rodillos y bobina de hilo metálico. La antorcha dispone de una palanca que, al pulsarla, inicia la soldadura. El equipo suele gestionar la aportación de gas y de hilo. En la siguiente *Figura 19* y *Figura 20* se puede observar dicho equipo. En la *Figura 20* se observa, a la izquierda, el conjunto de la máquina y, a la derecha, la antorcha de soldadura. Las imágenes de la *Figura 20* y otras de las imágenes que se muestran a lo largo de este escrito han sido tomadas en el laboratorio de mecánica TR45 ESEIAAT-UPC.



*Figura 19: Equipo de soldadura GMAW. Fuente: Jeffus, L., 2009. Pág. 11. [22].*



*Figura 20: Fotografías del equipo de soldadura GMAW. Fecha: 21/02/2020.*

### 3.5. Soldadura FCAW

La soldadura por arco con hilo tubular con núcleo de fundente (FCAW, del inglés *Flux Cored Arc Welding*) utiliza el mismo tipo de equipo que la soldadura GMAW. La diferencia radica en el tipo de hilo a utilizar. En este caso, el hilo tiene en su interior un núcleo de fundente. Esta reinención de la soldadura GMAW permite facilitar el proceso de soldadura y, en ocasiones, permite la soldadura sin utilización de gas de protección externo. El propio fundente aporta la atmósfera de protección necesaria.

El uso de este tipo de soldadura se ha visto incrementado debido a que mezcla la alta productividad de la soldadura GMAW con la sencillez de la soldadura SMAW. Las soldaduras obtenidas mediante esta técnica presentan escoria que debe ser retirada y, también, pueden producirse un mayor número de proyecciones durante el proceso.

### 3.6. Comparativa de los procesos de soldadura

A continuación, se comparan los distintos tipos de soldadura por arco mencionados anteriormente. Se presentan las ventajas e inconvenientes de cada proceso en la *Tabla 4*.

Comparativa de las técnicas de soldadura por arco presentadas		
Tipo de soldadura	Ventajas	Inconvenientes
<b>SMAW</b> (MMA o Electrodo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bajo coste.</li> <li>-Proceso simple, versátil y fácilmente transportable.</li> <li>-Capacidad para soldar la mayoría de los metales ferrosos y no ferrosos.</li> <li>-Capacidad de usarse en aire libre.</li> <li>-Útil en la mayoría de las juntas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Productividad reducida.</li> <li>-Velocidades de soldadura más lentas que en procesos GMAW.</li> <li>-Rendimiento del electrodo revestido inferior respecto a hilo o material de aporte en forma sólida.</li> <li>-Generación de escoria (debe ser retirada y genera incrustaciones que pueden debilitar la unión).</li> <li>-Formación de proyecciones y humo durante el proceso.</li> <li>-Cordones con interrupciones debido a la longitud limitada del electrodo.</li> </ul>
<b>GTAW</b> (TIG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Soldadura muy limpia, con buenos acabados y sin escoria.</li> <li>-Posibilidad de utilizar o no material de aportación (electrodo no consumible).</li> <li>-Prácticamente sin proyecciones y humos.</li> <li>-Obtención de cordones muy resistentes.</li> <li>-Posibilidad de automatización.</li> <li>-Sirve para casi cualquier metal.</li> <li>-Ampliamente utilizada en aluminio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Equipo complejo y costoso.</li> <li>-Necesidad de gas de protección.</li> <li>-Dificultades al soldar al aire libre con corrientes de aire.</li> </ul>
<b>GMAW</b> (MIG/MAG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Velocidades de soldadura mayores que en procesos SMAW y GTAW.</li> <li>-Mayor tasa de deposición y mayor rendimiento.</li> <li>-Obtención de soldaduras limpias y sin escoria.</li> <li>-Proceso semiautomático con posibilidad de automatización.</li> <li>-Facilidad y comodidad del proceso.</li> <li>-Útil para cualquier metal ferroso y no ferroso.</li> <li>-Capacidad de realizar cordones largos sin empalmes entre cordones.</li> <li>-Permite soldar en todas las posiciones con la correcta configuración.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Equipo más complejo y costoso que un equipo SMAW.</li> <li>-Necesidad de gas de protección.</li> <li>-Dificultades en uniones de difícil acceso.</li> <li>-Antorcha más pesada, aparatosa y con menor flexibilidad en el cableado.</li> <li>-Necesidad de aportar material (el material de aporte cumple la función de electrodo).</li> <li>-Dificultades al soldar al aire libre con corrientes de aire.</li> </ul>

<p><b>FCAW</b> (Hilo con núcleo fundente)</p>	<p>-Aúna la alta velocidad y tasa de producción de la soldadura GMAW con la simplicidad de la soldadura SMAW. -Sencillo y portable. -Obtención de cordones continuos.</p>	<p>-Genera escoria. Por tanto, posibles incrustaciones en el cordón (cordones de menor calidad). -Existen proyecciones y generación de humos durante el proceso.</p>
---	---	--

Tabla 4: Comparativa de los principales procesos de soldadura por arco eléctrico.

### 3.7. Método de soldadura escogido

La elección del proceso de unión o, en este caso, del proceso aditivo; depende de muchos factores. Entre ellos: la disponibilidad del equipo, la repetición de la operación, los requisitos de calidad, la ubicación del trabajo, los materiales a unir, la habilidad o experiencia de los trabajadores o las limitaciones de la máquina, el aspecto del producto terminado, el coste de los materiales y equipo, el tamaño de las partes a unir, los requisitos y especificaciones normativos y, el tiempo disponible.

Para escoger el método más adecuado deben considerarse todas las características descritas en los apartados anteriores. La *Tabla 4* del apartado “3.6. Comparativa de los procesos de soldadura” será de gran ayuda para la elección.

Primeramente, para escoger el correcto proceso de soldeo, se debe determinar cuáles de ellos son útiles para la aplicación final. Se debe pensar a qué va destinado y que resultados va a ofrecer. Con esta premisa, tanto la soldadura SMAW (MMA o electrodo) como la soldadura FCAW (hilo con núcleo fundente) no son aptas en procesos de fabricación aditiva. Esto es debido a la generación de escoria durante el proceso de soldeo. No puede soldarse un cordón encima de otro si existe escoria o impurezas. Las distintas capas no se adherirían bien y se generaría una pieza muy débil, con impurezas y con pobres cualidades estructurales.

Además, el proceso SMAW presenta dificultades para su automatización debido a la longitud limitada de los electrodos y al movimiento de avance y descenso necesarios para su aplicación. El proceso FCAW sería más sencillo de automatizar, pero debería diseñarse un modo de limpiar la escoria y preparar la soldadura de forma eficaz para la aplicación de las siguientes capas. Ambos métodos presentan grandes inconvenientes para la aplicación a sistemas de fabricación aditiva medianamente automatizados. Por todos estos motivos, las soldaduras SMAW y FCAW han sido descartadas.

La decisión queda entonces entre la soldadura GTAW y GMAW. La soldadura GMAW presenta la gran ventaja de ser un proceso ya semiautomático de por sí. Es la propia máquina la que regula el paso del gas y la velocidad del hilo según los parámetros eléctricos introducidos. Al apretar el botón de la antorcha, la máquina proporciona la corriente eléctrica al hilo, éste empieza a fluir, genera el arco y funde sobre la superficie. La sencillez de automatización y aplicación de la soldadura GMAW fueron la causa de considerarla, primeramente, como la técnica a aplicar. Activar la antorcha no supone una complicación elevada, esto podría hacerse mediante software capaz de activar un relé o un actuador mecánico en el momento adecuado. La soldadura GMAW fue descartada por el gran peso de la antorcha y la rigidez que ejerce el cableado (podía existir falta de potencia en los motores disponibles), la disponibilidad del equipo (el equipo disponible



en el laboratorio estaba preparado para soldar aluminio y debía ser modificado), la terminación de la soldadura (calidad algo inferior que la soldadura GTAW), la imposibilidad de controlar el arco y el material de aportación por separado y, el mayor número de proyecciones y temperatura generado durante el proceso (punto importante considerando que se va a acoplar a una máquina de pequeñas dimensiones).

Finalmente, el proceso de soldadura elegido es la soldadura **GTAW**, o también nombrada **TIG**. Este proceso tiene leves ventajas frente al proceso GMAW. La principal ventaja es la gran calidad y limpieza en las soldaduras. También, permite controlar el arco y el material de aporte de forma independiente, de modo que, si se cree conveniente, puede utilizarse sin material de aportación para mejorar acabados superficiales situando la antorcha en la cara terminada uniendo los distintos cordones de soldadura (esto último es algo conceptual que requeriría estudio). Es cierto que la automatización del proceso es algo más compleja que la soldadura GMAW, ya que se debe diseñar la forma de aportar el material. Pero, también, ofrece más posibilidades de configuración y versatilidad. En la soldadura GTAW, la escoria y las proyecciones son prácticamente nulas. La nube de humos y la temperatura son menores y, más concentradas y controladas. La antorcha es muy liviana y el cableado prácticamente no ofrece resistencia al movimiento; esto simplificará el diseño de la sujeción y, permitirá trabajar con los motores disponibles. Frente a la aportación de gas de protección, no ofrece ventajas, ya que ambos sistemas necesitan de él. En lo que respecta a la activación del arco, depende en gran medida de la máquina a usar. Existen máquinas donde no es necesario activar ningún botón; la rotura del arco puede realizarse al acercar la antorcha a la pieza (alta frecuencia) o por contacto directo con la pieza (*lift-arc*). Generalmente, el arco generado en este tipo de soldadura es bastante estable. Finalmente, la disponibilidad del equipo y la ubicación de éste, también han sido factores determinantes para su elección. Es por todo lo comentado que, finalmente, el método de soldadura que se va a usar en la máquina de fabricación aditiva va a ser el **GTAW (TIG)**.

Por otra parte, los métodos de soldadura láser y por haz de electrones también ofrecen un gran abanico de posibilidades, pero su costo es demasiado elevado para un proyecto de estas características. El coste del equipamiento y la disponibilidad de éste, son las razones por las que no se han evaluado ni considerado estas tecnologías.

### 3.8. Seguridad en la soldadura

La soldadura, como cualquier proceso industrial, tiene un cierto número de peligros asociados. La toma de las correctas medidas de seguridad hará que estos peligros no causen heridos. La mejor forma de prevenir riesgos es el sentido común y la precaución. El establecimiento de normativas y protocolos de seguridad ayuda a prevenir riesgos y, además, en caso de que se produzcan, determina un protocolo de actuación.

Dicho esto, dado que en este proyecto es necesario utilizar métodos de soldadura, se cree conveniente comentar brevemente los peligros existentes y las medidas de seguridad a tomar. Entre los riesgos más comunes en procesos que involucren la soldadura están las quemaduras, estas pueden producirse por contacto o por radiación. También existen riesgos oculares, auditivos, respiratorios, de incendios, golpes, explosiones de bombonas y eléctricos, entre otros.



Las quemaduras son las heridas más frecuentes. Según la gravedad se identifican en primer, segundo y tercer grado. Dependiendo de la gravedad será necesario o no tratamiento médico. En quemaduras de tercer grado es necesario acudir al médico para que éstas sean tratadas. Las quemaduras de primer y segundo grado pueden ser peligrosas si se producen cerca de boca, nariz u ojos. Como recomendación general de tratamiento en quemaduras leves, según [22], se debe aplicar agua fría, lavar, secar y aplicar una gasa o venda estéril. En caso de tener ropa adherida a la herida, no retirar. Para casos graves, acudir al médico.

La mejor forma de evitar las quemaduras por contacto es utilizar ropa de trabajo adecuada. La mejor elección son tejidos cien por cien lana o, en su defecto, tejidos cien por cien algodón con colores oscuros para evitar la radiación ultravioleta, estrechamente tejido y grueso. La ropa debe ser de manga larga y se debería utilizar calzado de protección. A parte de la ropa de trabajo, durante el proceso de soldeo se debe utilizar ropa de protección especial. Esta suele ser de cuero y resistente a quemaduras. Dependiendo del trabajo a realizar y de la posición de soldeo se recomiendan unas prendas u otras. Lo más seguro es utilizar chaquetas, pero suelen ser incómodas. Pueden utilizarse mandiles o petos y existen, también, manguitos para brazos y piernas. Existen gran variedad de productos, no es el objetivo de este proyecto estudiarlos más a fondo.

Los guantes serán siempre necesarios para soldar. Lo mejor es utilizar guantes de piel aislados. Si se necesita tener más tacto durante el trabajo, pueden utilizarse guantes más flexibles con precaución. Existen tres clasificaciones para los elementos de seguridad según la *directiva relativa al equipamiento de seguridad personal 89/686/CEE*. Cat.I: para riesgos mínimos. Cat.II: para riesgos moderados y Cat.III: para riesgos elevados. Para el caso de los guantes, existen diversas normas que clasifican las exigencias de éstos. Por nombrar algunas, EN 388 (riesgos mecánicos), EN 407 (calor y/o fuego), EN 420 (exigencias generales para guantes), etcétera [23]. El cumplimiento de estas exigencias debe marcarse en los equipos de protección individual (EPI) mediante pictogramas y números que faciliten la identificación. Ver ejemplos en la *Figura 21* y *Figura 22*.

		Niveles de prestación				
		1	2	3	4	5
	<b>Riesgos mecánicos EN 388</b>					
	a Resistencia a la abrasión	En número de ciclos				
	b Resistencia al corte por cuchilla	Índice				
	c Resistencia al rasgado	En Newtons				
	d Resistencia a la perforación	En Newtons				
		100	500	2000	8000	–
		1,2	2,5	5,0	10,0	20,0
		10	25	50	75	–
		20	60	100	150	–

Figura 21: Ejemplo de pictograma necesario en los EPI que indica las especificaciones según norma EN 388 de riesgos mecánicos. Fuente: Scharlab. The lab sourcing group [23].



Figura 22: Guantes adecuados para la soldadura. Se pueden observar los pictogramas que indican la categoría y las especificaciones que cumplen, según norma. Fecha: 21/02/2020.

El daño ocular es otro de los peligros de los procesos de soldadura. Durante el proceso de soldadura se pueden producir tres tipos de radiación o luz: la luz visible, la luz infrarroja y la luz ultravioleta. Todas ellas se producen durante los procesos de soldadura por arco. Todas ellas son peligrosas y, pueden producir quemaduras en la piel y ojos e incluso ceguera. No sólo la incidencia directa es peligrosa, la luz se refleja en las paredes y objetos e incide sobre las personas de forma indirecta. Por tanto, los trabajadores que se encuentren en la zona de soldadura deben llevar protección ocular.

La luz ultravioleta es el tipo de luz más peligroso, ya que es capaz de producir graves quemaduras oculares y en la piel. La luz infrarroja es peligrosa pero sus quemaduras pueden evitarse, ya que el cuerpo humano es capaz de sentir el calor. Finalmente, la luz visible puede provocar ceguera temporal y vista cansada. Los distintos tipos de luz y su gravedad varía según la intensidad del arco producido. En caso de daño ocular se debe acudir al médico.

Las protecciones oculares son obligatorias y existen distintos tipos. El mínimo obligatorio para la persona que está soldando es la careta de soldadura. En la siguiente *Figura 23* se puede observar la careta disponible en el laboratorio. Ésta es una careta automática que oscurece los vidrios al detectar el arco. Se puede ajustar el nivel de oscurecimiento (DIN 9-13).



*Figura 23: Careta de soldadura automática DIN 9-13. Fecha: 21/02/2020.*

Para el correcto ajuste de la careta se puede consultar la tabla mostrada en la *Figura 24* en la cual se especifica el nivel de oscurecimiento DIN a utilizar según el tipo de soldadura e intensidad eléctrica.

El entorno de soldadura suele ser ruidoso. Proteger los oídos puede prevenir la sordera a largo plazo, para ello, pueden utilizarse tapones u orejeras (protegen el oído externo de quemaduras).

También deberán tomarse medidas para la protección respiratoria. En el entorno pueden generarse humos, polvo, partículas o químicos nocivos. Para eliminarlos será necesario disponer de un buen sistema de ventilación. La norma puede exigir tratar los gases antes de liberarlos. Los fundentes pueden provocar irritación en nariz, garganta y pulmones.

Processo de Soldagem ou técnicas relacionadas	Corrente em Amperes																								
	0,5	1	2,5	5	10	15	20	30	40	60	80	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400	450	500	
Eletrodo Revestido Arcos Fluxados									9	10			11					12				13			14
MIG / Metal Inert Gas (Ar / He) Aços, Aços Ligados, Cobre, etc.													10	11				12				13			14
MIG / Metal Inert Gas (Ar / He) Alumínio, Cobre, Níquel, outras ligas.													10	11				12			13		14		15
TIG / Tungsten Inert Gas (Ar / He) Todos os metais soldáveis.									9	10			11					12			13				
MAG / Metal Active Gas (Ar/CO <sub>2</sub> /He/H <sub>2</sub> ) Aços, Aços Ligados, Cobre, etc.												10	11	12				13			14				15
Goivagem com Ar Comprimido															10	11	12	13			14				15
Corte a Jato de Plasma														11				12			13				
PAW / Plasma Arc Welding	2,5 4	5	6	7	8	9	10	11				12					13			14					15
	0,5	1	2,5	5	10	15	20	30	40	60	80	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400	450	500	

Figura 24: Tabla de referencia para la graduación de la careta según tipo de soldadura e intensidad (numeración DIN). Fuente: [24].

En caso de ser necesario, se deberán usar mascarillas o respiradores adecuados a cada uno de los trabajos. Se recomienda limpiar las piezas de pintura, grasa, aceite o de productos químicos antes del soldeo. Químicos, como el hidrocarburo clorado (presente en disolventes), pueden destruir el tejido pulmonar al formar subproductos durante la operación de soldadura. Soldar metales como el cromo, cadmio, zinc, plomo, berilio, mercurio o manganeso, también, puede ser perjudicial para la salud. La acumulación de ciertos gases de soldadura en espacios pequeños puede resultar en un peligro para los trabajadores. En cualquier caso, será necesaria una evaluación particular de los peligros y tomar las medidas necesarias.

Por lo que respecta a la protección eléctrica, será necesario proteger todos los terminales eléctricos, disponer de una buena instalación y toma de tierra, utilizar zapatos aislados, comprobar periódicamente el cableado, apagar los equipos cuando no se utilicen y, en entornos húmedos, tomar medidas especiales.

La manipulación y almacenamiento de bombonas de gas debe estar sujeta a estrictas medidas de seguridad. Por ejemplo, no deben almacenarse cerca bombonas de oxígeno con bombonas de gases combustibles. Es más, la normativa puede exigir tener las bombonas en espacios separados y protegidos contra incendios. Las bombonas de gas inerte pueden almacenarse con las de oxígeno. Existen códigos de colores para diferenciar cada tipo de gas. Todas las bombonas deben asegurarse con cadenas o sujeciones y estar correctamente resguardadas y protegidas.

En entornos de soldadura existen múltiples riesgos de incendio. Es por esto por lo que es necesario tomar medidas de protección contra incendios. Los extintores deben ser fácilmente identificables y estar a mano. Se debe utilizar el correcto tipo de extintor en cada caso: A (triángulo verde), para combustibles sólidos; B (cuadrado rojo), para combustibles líquidos; C (círculo azul), para fuegos eléctricos y; D (estrella amarilla), para incendios con metales combustibles [22].

## 4. DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE LA MAQUINARIA

A lo largo de este capítulo se definen, en cada uno de los apartados correspondientes, los distintos elementos que conforman la máquina diseñada. Este capítulo está enfocado a describir el *hardware* que compone el equipo de fabricación aditiva.

### 4.1. Máquina de fabricación aditiva

Como punto de partida, en este proyecto se utiliza una máquina impresora 3D. A esta máquina se le realizan un conjunto de modificaciones para cumplir con el propósito del proyecto. Más concretamente, la máquina que se utiliza como base, es la impresora 3D Anet A8. Esta máquina la podemos observar en la siguiente *Figura 25*. Este tipo de máquinas de fabricación aditiva se basan en la tecnología de extrusión de material (las distintas tecnologías de fabricación aditiva fueron descritas, anteriormente, en el apartado “2.4. Principales procesos de fabricación aditiva”).

La Anet A8 se trata de una máquina cartesiana de 3 ejes (X, Y, Z) con un volumen de impresión de 220\*220\*240 mm. A continuación, se citan algunas de las características y especificaciones de la máquina. Ésta incluye una boquilla de 0,4 mm y las velocidades de impresión recomendadas son de entre 10 a 120 mm/s. La precisión de posición de los ejes X e Y es de 0,05 mm con transmisión del movimiento mediante correa y la precisión de posición del eje Z es de 0,015 mm con transmisión del movimiento mediante husillo. El grosor de capa es de entre 0,1-0,3 mm. La máquina contiene 5 motores paso a paso; uno para el eje X; uno para el eje Y; dos clonados para el eje Z y; uno para alimentar el filamento del extrusor. Está pensada para trabajar materiales como el PLA o el ABS con un diámetro de filamento de 1,75 mm. El control de la máquina se puede realizar a través de un ordenador o desde la pantalla que incorpora el equipo. También, posee lector de tarjetas microSD para transferir los archivos. El tamaño total de la máquina es de 500\*400\*450 mm y el peso total es de 7,5 kg. Todos estos datos han sido extraídos de la ficha técnica y de la documentación adjunta del equipo. También pueden consultarse en su portal oficial [25].



*Figura 25: Impresora 3D Anet A8. Fuente: Documentación adjunta al equipo [25].*



Es necesario conocer las especificaciones y características de la máquina para poder realizar las modificaciones necesarias con el fin de adaptar la maquinaria existente al proceso de fabricación aditiva deseado.

#### 4.1.1 Montaje de la impresora 3D

La máquina se distribuye desmontada. Por tanto, es necesario montarla. El montaje de la máquina, la calibración y las primeras impresiones de prueba tomaron un tiempo total de 9 horas. El proceso de montaje no presenta gran complicación, ya que se facilitan las instrucciones para dicho montaje. En este apartado, se hacen algunos incisos que no vienen indicados en el manual y que pueden facilitar el proceso.

Antes de empezar, debe realizarse un listado y comprobación de los materiales y herramientas necesarios. En la siguiente *Figura 26* puede verse el proceso. La detección temprana ahorrará tiempo y esfuerzo durante el proceso de montaje. En este caso en particular, se detectaron algunas deficiencias en la tornillería que pudieron ser subsanadas con el material disponible. El listado de materiales se encuentra en el manual de montaje, en el anexo “A1. Lista de materiales-Impresora 3D Anet A8” se incluye dicho listado.



*Figura 26: Fotografías que muestran el proceso de listado de material. De izquierda a derecha: Revisión piezas estructurales, revisión de tornillería y revisión de componentes eléctricos y piezas auxiliares. Fecha: 09/03/2020.*

Las piezas estructurales de acrílico vienen con una protección para no ser rayadas. Para proteger dichas piezas, no se retiró la protección (los procesos que implican soldadura producen un entorno hostil y cuanto más protección de los elementos, mejor). También es importante limpiar todas las piezas correctamente. Los conectores eléctricos tenían parte del embalaje incrustado en los pines de conexionado. Si los conectores contienen objetos o residuos se pueden producir malas conexiones y doblamiento de pines. Se recomienda, por experiencia propia, utilizar herramientas de mejor calidad a las incluidas en el kit de montaje. También es necesario realizar ajustes a alguna de las piezas, ya que no encajan correctamente. No supuso ninguna complicación, con la ayuda de una lima se ajustaron las pequeñas tolerancias que no permitían el correcto ajuste. También, se aconseja la eliminación de cantos vivos en las piezas que puedan producir cortes y que no vienen correctamente terminadas. Se recomienda realizar la colocación y el tensado de las correas del eje X antes de la colocación del extrusor, al contrario de lo que marca el manual. Más tarde, al realizar la calibración de la máquina, se ajustan todos los elementos correctamente. A continuación, en la *Figura 27* se muestran algunas imágenes

del proceso de montaje. En dicha figura se puede observar, a la izquierda, la estructura principal y, a la derecha, el conexionado de la electrónica y el montaje del motor del eje Y.

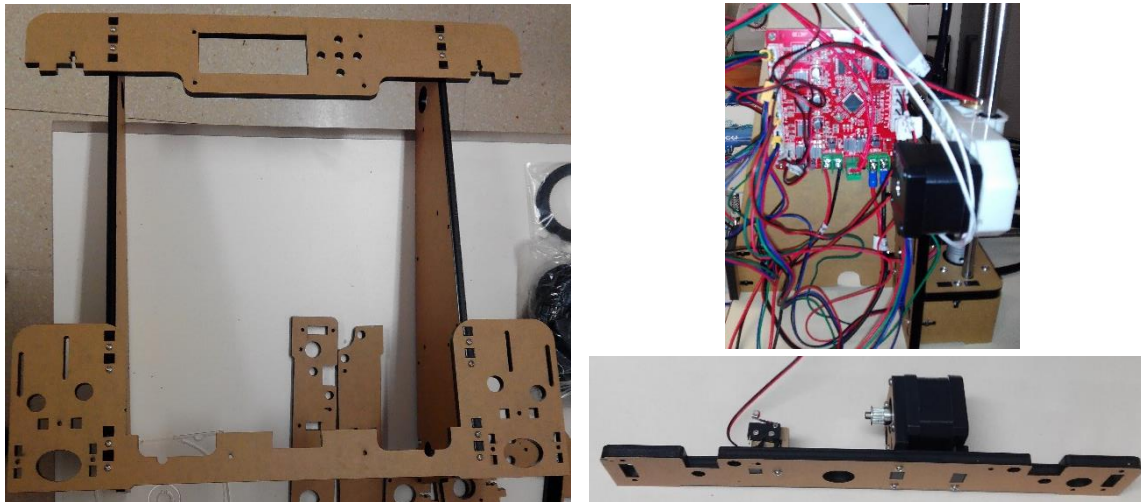


Figura 27: Fotografías del proceso de montaje de la impresora 3D Anet A8. Fecha: 09/03/2020.

#### 4.1.2 Calibración y pruebas de impresión

Antes de poner en funcionamiento la máquina, ésta debe ser calibrada correctamente. Una mala calibración generará defectos en la pieza final. Tras la realización de la calibración, es necesario realizar algunas pruebas de impresión para terminar de ajustar todos los parámetros de impresión. En este proyecto, el destino final de la máquina no es imprimir piezas en material plástico; es por esto por lo que sólo se realizarán unos ajustes previos para comprobar el correcto funcionamiento del equipo. Tras estos primeros ajustes, la máquina será modificada para adaptarla al nuevo proceso de fabricación aditiva. Tras las modificaciones, será necesario comprobar nuevamente todas las calibraciones para la obtención de buenos resultados. En este apartado, se explica de forma breve como realizar las primeras calibraciones de la máquina y se muestran, también, las primera pruebas de impresión en PLA.

Para la calibración se recomienda el precalentamiento de la cama caliente para evitar errores de calibración debidos a las dilataciones de ésta. La cama o base dispone de unos muelles y tornillos que permiten ajustar la altura de ésta. El primer paso para calibrar la máquina es colocar la cama a la mínima altura apretando los tornillos. De este modo, si es necesario subir la altura de la cama se dispondrá de suficiente margen de maniobra. Tras realizar este paso, se debe subir el final de carrera del eje Z a la máxima altura. Seguidamente, se debe comprobar la horizontalidad de las guías del extrusor. Para ello, se mide la altura del eje Z de la izquierda y se ajusta la altura del eje Z de la derecha para que coincida. Para poder mover los motores, éstos deben estar deshabilitados. Se pueden deshabilitar mediante el menú de la impresora.

Después de realizar estas primeras acciones, se debe acceder al menú de la impresora y ordenarle ir al cero de la máquina (*Home all*). Esta acción hará que la máquina se mueva



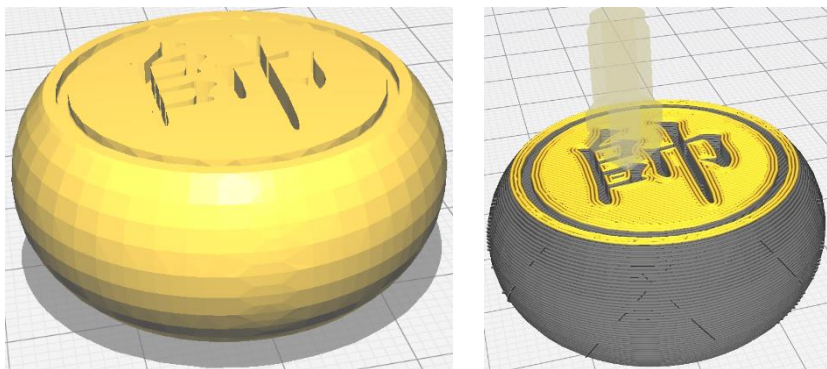
hasta los finales de carrera. Si se quieren mover los motores de nuevo, se deben deshabilitar nuevamente.

Ahora, debe medirse la altura entre la boquilla y la plataforma. El final de carrera del eje Z se debe modificar para acercar la boquilla a la cama. Para ello, se debe mover el final de carrera del eje Z hacia abajo la misma altura que hemos medido entre la boquilla y la base (aproximadamente 23 mm). Después se ordena, nuevamente, el movimiento hasta el cero de la máquina. Se deshabilitan los motores y, mediante una hoja de papel situada entre la boquilla y la base de impresión, se ajusta la altura de la cama aflojando los tronillos de ésta. El papel debe moverse entre la boquilla y la cama, pero debe pasar muy justo. Se debe realizar esta acción en cada una de las esquinas y en el centro de la base. Finalmente, se realiza una nueva comprobación de que todo está calibrado correctamente. El proceso es sencillo, básicamente, se trata de ajustar la altura dejando la plataforma bien nivelada. Realizando todo esto, la impresora ya está correctamente calibrada.

Tras calibrar la máquina se debe insertar el filamento en el extrusor. Se corta la punta del filamento en diagonal, se endereza y se introduce en el extrusor. Es importante precalentar el extrusor y presionar el filamento hasta que salga por la boquilla. En la primera prueba de impresión no se presionó correctamente el filamento, esto provocó que en las primeras capas de la impresión no saliera material. El resultado fue una impresión errónea.

Tras la primera prueba de impresión (fallida, por una mala colocación del filamento) se procedió a realizar una segunda prueba. Cabe mencionar que el G-code se realizó con el programa de laminación Cura versión 14.07 configurado adecuadamente al tipo de máquina a utilizar (se deben introducir parámetros como las dimensiones de la superficie de impresión, el tipo de máquina, el diámetro de la boquilla, el diámetro del filamento, etcétera). Existen versiones del programa más recientes que, configurándolas adecuadamente, funcionan perfectamente y ofrecen algunas mejoras.

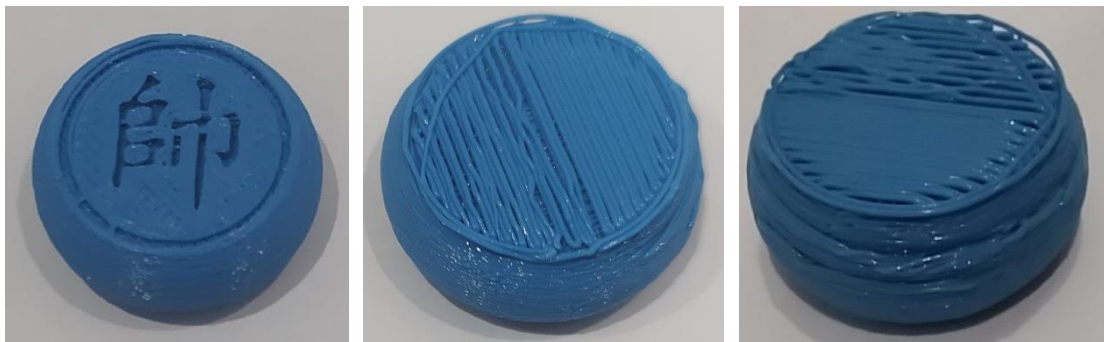
La pieza que se imprimió es una pieza de muestra. El archivo STL se entrega con la documentación de la impresora. Para la realización de una prueba es recomendable escoger piezas que no requieran mucho tiempo de impresión y que sean adecuadas para evaluar las variables deseadas. La pieza utilizada para la realización de la prueba es la mostrada en la siguiente *Figura 28*. En dicha figura se visualiza del modelo STL que se ha realizado mediante el programa de laminación Ultimaker Cura 4.5. A la derecha se puede observar la previsualización del proceso capa a capa.



*Figura 28: Modelo 3D de la pieza prueba. Visualización en Ultimaker Cura 4.5.*

Se configuró la impresión para observar el movimiento de la máquina a velocidades elevadas (100 mm/s). Elevar la velocidad de impresión puede generar piezas con defectos por la pérdida de pasos en los motores, por un aumento en las vibraciones y por la imprecisión de los movimientos. En este caso, se configuró a una velocidad elevada para ahorrar tiempo y observar los movimientos cerca del límite de las posibilidades de la máquina. Si los movimientos son fluidos y correctos a velocidades elevadas, probablemente, también lo serán a velocidades más bajas. Cabe destacar que durante el proceso de soldadura las velocidades deben ser mucho menores, en el caso de soldadura TIG, las velocidades del proceso se sitúan en torno a 1 y 10 mm/s.

Los parámetros de impresión fueron los siguientes: velocidad de impresión 100 mm/s, altura de capa 0,1 mm, grosor de pared 0,8 mm, 20% de relleno, temperatura del material de impresión 210 °C, temperatura de la cama 70 °C, filamento de PLA azul con un diámetro de 1,75 mm y, sin la adición de soportes ni bordes para la adherencia a la placa de impresión. Se pulverizó laca en la plataforma para mejorar la adherencia de la primera capa. La impresión tomó un tiempo aproximado de 18 minutos y los resultados se muestran en la siguiente *Figura 29*. En la imagen de la izquierda, de la *Figura 29*, se muestra la parte superior de la pieza, en la imagen central, se muestra la parte inferior de la pieza y, en la imagen de la derecha, se muestra ampliado un defecto generado en el lateral de la pieza.



*Figura 29: Fotografías de la pieza obtenida en la primera prueba de impresión.*

Como se puede observar en la *Figura 29*, la calidad de la pieza obtenida es mejorable. Aparecieron algunos defectos en la pieza debidos en gran medida a la calibración de la plataforma y a la elevada velocidad de impresión. En la imagen central se observa que la primera capa de impresión no fue correctamente adherida a la base. Los motivos pueden ser varios: boquilla demasiado separada de la base, velocidad de impresión de la primera capa demasiado elevada, mala configuración de las temperaturas o del ventilador de capa y la falta de un borde o soportes para mejorar la adherencia (conocido como *brim* y *raft*, respectivamente). Por lo que se pudo observar durante la impresión, la boquilla estaba demasiado separada de la base de impresión. Los defectos en la calibración junto con la inexistencia de un borde o soporte para mejorar la adherencia causaron una mala adhesión de la primera capa. La solución es clara, mejorar la calibración de la máquina, bajar un poco la velocidad en la primera capa y programar un borde o unos soportes para mejorar la adherencia.

Esta falta de adhesión en la primera capa provocó, en parte, los defectos que se observan en la imagen de la derecha. En dicha imagen, se observa un defecto en el lateral de la

pieza. Esto es debido a una sobre extrusión y, también, a la irregularidad de las capas en esa zona debida a la falta de adherencia de la primera capa. La solución sería ajustar los parámetros de extrusión para que se extruya la cantidad exacta de filamento. De todas formas, lo más probable es que solucionando la adherencia de la primera capa, estos defectos disminuyan, ya que solamente ha afectado a una parte de la pieza y no a todo el perímetro.

Como ya se ha dicho anteriormente, la pieza es claramente mejorable. Se han presentado algunas formas de subsanar los principales defectos observados. En caso de querer obtener mejores acabados superficiales, es necesario ajustar todos los parámetros adecuadamente. Para el objetivo de este proyecto, la impresión obtenida en esta pieza prueba es adecuada. Se ha observado el correcto movimiento de todos los ejes de la máquina y se ha comprobado que funciona adecuadamente. Se considera que la fluidez de los movimientos es correcta para adaptar la máquina a un proceso de soldadura por arco eléctrico.

## 4.2. Configuración del equipo de soldadura

En este apartado, se define el equipo de soldadura. Se describen sus características técnicas, sus limitaciones, sus posibles configuraciones y, también, se exponen todos los elementos necesarios para su utilización. Además, se comentan las posibles configuraciones y parámetros de soldadura.

### 4.2.1 Equipo de soldadura

El soldador que se va a utilizar en este proyecto es el modelo Core 200i de la marca Solter. El equipo se muestra en la siguiente *Figura 30*. Se trata de un soldador inverter para soldadura GTAW (TIG) aunque, también, es posible utilizarlo en procesos SMAW con electrodos revestidos de 1,6 a 4 mm. Tal y como se describió anteriormente en el apartado “3.7. Método de soldadura escogido”, el proceso de soldadura a utilizar en este proyecto es el GTAW (TIG), por tanto, este soldador es adecuado.



Figura 30: Equipo de soldadura Solter Core 200i. Fecha: 21/02/2020.

Existen diversas formas de cebar o iniciar el arco eléctrico en soldadura TIG. Principalmente, podemos diferenciar tres tipos: *Scratch*, *Lift-Arc* y *HF*. A continuación, se describe brevemente en que se basa cada una de ellas:

- El cebado *Scratch* se basa en establecer el arco eléctrico rozando y rascando con el electrodo de tungsteno la pieza a soldar.
- El cebado *Lift-Arc* se basa en establecer el arco eléctrico al tocar levemente la pieza con el electrodo de tungsteno y, posteriormente, levantarlo. Este método ofrece la ventaja de generar menor contaminación en el electrodo, ya que se evita el roce con la pieza a soldar.
- El cebado por alta frecuencia o HF, del inglés *High Frequency*, establece el arco de forma automática al acercar el electrodo a la pieza. No es necesario el contacto con la pieza, de modo que, se evita la contaminación del electrodo.

De todas estas formas de iniciar el arco eléctrico, la más sencilla de implementar en un proceso de fabricación aditiva es la HF y, la más compleja, la *Scratch*. El equipo de soldadura marcará la forma de cebar el arco. En este caso, el equipo de soldadura que se va a utilizar rompe el arco mediante la tecnología *Lift-Arc*. Por tanto, será necesario programar movimientos específicos para la rotura del arco en cada una de las capas. Esto complica levemente la programación de las trayectorias de la máquina, pero no es un impedimento para la adaptación del proceso a fabricación aditiva.

A continuación, se exponen algunas de las especificaciones y características técnicas del equipo escogido. La regulación del equipo es analógica con un rango de regulación de la intensidad desde 20 hasta 200 A. Tiene las funciones *Anti-Stick* (detecta cuando el electrodo se pega a la pieza y disminuye el valor de la corriente automáticamente para facilitar el despegado), *Arc-Force* (durante la soldadura, el equipo es capaz de leer y modificar los parámetros de soldadura con el fin de mantener un arco estable) y *Hot-Start* (cuando el equipo detecta el contacto con la pieza a soldar, precalienta el electrodo enviando un valor de corriente ligeramente superior al predeterminado. Esta función ayuda a iniciar el arco). Los electrodos de tungsteno admisibles van desde 1,0 mm hasta 3,2 mm. El equipo es capaz de utilizarse conectado a generadores. La conexión con la red eléctrica es a 220-240 V. La potencia absorbida máxima es de 9,2 kVA. La  $I_{max}$  de 40 A y la  $I_{eff}$  de 25 A. El voltaje en vacío es de 72 V. El equipo tiene unas dimensiones reducidas de 370\*120\*210 mm y un peso de 5,5 kg. En el equipo vienen serigrafiados algunos valores y características importantes. Se muestran en la siguiente *Figura 31* y se comentan a continuación.







		Solter Soldadura, SL 17530 Campdevànol - Spain			
Core 200i			Nº		
			EN 60974-1 EN 60974-10		
		20A / 20.8V ~ 200A / 28V			
 $U_0=72V$		X	40%	60%	100%
		$I_2$	200A	160A	135A
		$U_2$	28V	26,4V	25,4V
 1 ~ 50/60Hz		$U_1=230V$	$I_{1\max} = 40A$	$I_{1\text{eff}} = 25A$	
IP21S					

Figura 31: Serigrafía del equipo de soldadura Solter Core 200i. Fecha: 21/02/2020.



Los valores que se muestran en la *Figura 31* son importantes porque indican como trabajar con el equipo. Los valores de la tabla definen lo que se conoce bajo el nombre de ciclo de trabajo, factor de servicio o factor de marcha. El ciclo de trabajo expresa en un porcentaje el tiempo que la máquina puede soldar de forma continuada y sin interrupciones. Se toma como base un período de tiempo de 10 minutos. Este tiempo se divide en tiempo de trabajo y tiempo de descanso. El porcentaje indica el tiempo de trabajo en base a los 10 minutos. Es decir, un 60% indica que el equipo es capaz de trabajar durante 6 minutos seguidos y, posteriormente, descansar 4 minutos. Mientras que un 100% indica que el equipo es capaz de trabajar de forma ininterrumpida.

Estos valores del ciclo de trabajo son importantes porque limitan el tiempo de funcionamiento del equipo. Los equipos de soldadura se calientan durante el proceso de soldeo y, en caso de sobrepasar estos límites, el equipo se puede sobrecalentar y activar la desconexión automática como método de protección. Si se exceden estos límites de forma continuada, el equipo puede averiarse.

Cuanto mayor sea el amperaje utilizado, mayor será el calentamiento del equipo y menor el tiempo de trabajo. El tiempo de descanso es, generalmente, utilizado para preparar la siguiente junta de soldadura, limpiar escoria, etcétera. En soldaduras largas o en soldaduras continuadas que no necesitan preparación puede ser necesario establecer un amperaje menor con el fin de obtener un mayor tiempo de trabajo.

El equipo de soldadura utilizado muestra tres puntos del ciclo de trabajo. Estos puntos marcan las limitaciones del equipo y sirven de referencia para ajustar el amperaje al trabajo a realizar. El primer punto, permite un tiempo de trabajo de 4 minutos (40%) con un amperaje de 200 A y un tiempo de descanso de 6 minutos. El segundo punto, permite un tiempo de trabajo de 6 minutos (60%) con un amperaje de 160 A y un tiempo de descanso de 4 minutos. El último punto, indica que se permite trabajar ininterrumpidamente (100%) siempre que el amperaje esté por debajo de 135 A.

Por lo que respecta a la adaptación de la soldadura a un proceso de fabricación aditiva, interesa que el equipo sea capaz de soldar ininterrumpidamente durante toda la capa o sección de la pieza. Sería posible establecer tiempos de descanso entre capa y capa, de hecho, puede ser necesario para la estabilización del material. Se considera que para adaptar esta máquina de soldadura al proceso de fabricación aditiva será necesario trabajar a valores de amperaje por debajo de los 135 A con el fin de garantizar el funcionamiento continuo del equipo durante el proceso. Esto permite soldar de forma continuada sin necesidad de preocuparse por el sobrecalentamiento de la máquina durante todo el proceso de fabricación. Si, por el contrario, es imperativo soldar a más amperaje, será necesario realizar un plan de descansos entre capa y capa para no sobrecalentar el equipo, considerando, también, los tiempos necesarios para la estabilización del material.

#### 4.2.2 Material de aporte

La soldadura TIG puede realizarse sin o con aportación de material. En un proceso de fabricación aditiva no tiene sentido no aportar material. El material de aporte debe ser de la misma composición que el material base. Se debe utilizar material de aporte destinado a soldadura TIG, ya que, por ejemplo, las varillas de acero cobreado para soldadura

oxiacetilénica pueden contaminar el electrodo de tungsteno [10]. Las varillas de soldadura TIG se clasifican igual que los alambres de soldadura MIG. En el anexo “A2. *Clasificación material de aporte TIG*” se puede observar dicha clasificación.

Para este proyecto se va a utilizar, según clasificación AWS A5.18 [26] y normativa UNE-EN 440, hilo ER-70S-6 de diámetro 0,8 mm destinado a aceros al carbono (La R es indicativo de que funde sin necesidad de conducir la corriente del arco eléctrico, por tanto, es válido para soldadura TIG). La bobina de hilo se muestra en la siguiente *Figura 32*.



*Figura 32: Fotografía del hilo ER-70S-6 de diámetro 0,8 mm. Fecha: 21/02/2020.*

El material de aportación ER-70S-6 presenta un carácter desoxidante debido a elevadas cantidades de silicio y manganeso. Es versátil, de sencilla utilización y genera buenos cordones sobre superficies sucias y oxidadas [10]. Según norma AWS A5.18 [26], la composición del hilo ER-70S-6 se indica en la siguiente *Tabla 5*.

<b>Composición del hilo ER-70S-6 según AWS A5.18 [26]</b>				
<b>% C</b>	<b>% Mn</b>	<b>% Si</b>	<b>% S</b>	<b>% P</b>
0,06-0,15	1,40-1,85	0,8-1,15	0,035 Máx.	0,025 Máx.
<b>% Cr</b>	<b>% Ni</b>	<b>% Mo</b>	<b>% V</b>	<b>% Cu (Total)</b>
0,15 Máx.	0,15 Máx.	0,15 Máx.	0,03 Máx.	0,5 Máx.

*Tabla 5: Composición del hilo ER-70S-6 según norma AWS A5.18. Fuente: [27].*

Los aceros al carbono suelen presentar buena soldabilidad, si el contenido de carbono es elevado, pueden presentarse ciertas complicaciones. La aparición de fisuras debidas al enfriamiento brusco y a la formación de una estructura martensítica es uno de los principales problemas cuando se sueldan aceros al carbono. El alambre escogido tiene un contenido de carbono medio-bajo, por lo que, el proceso de soldadura será menos problemático.

#### 4.2.3 Tipo de corriente en soldaduras TIG

Son tres los distintos tipos de corriente aplicables a la soldadura TIG: corriente alterna con estabilización por alta frecuencia, corriente continua con polaridad directa y corriente continua con polaridad inversa. El material a soldar y el tipo de soldadura determinan el tipo de corriente a utilizar. En soldadura TIG, generalmente, se utiliza corriente continua con polaridad directa (antorcha conectada al negativo y pieza al positivo) para materiales férricos y corriente alterna con estabilización por alta frecuencia en materiales no férricos. La corriente continua con polaridad inversa no suele ser recomendable en procesos TIG, aunque se puede utilizar en aluminio o magnesio. En el anexo “A3. *Tipos de corriente en*



*soldaduras TIG*” se muestra detallado en una tabla el tipo de corriente a utilizar según el metal a soldar.

De forma genérica, la corriente con polaridad directa genera mayor penetración, mayor aportación de calor y cordones más estrechos y, la corriente con polaridad inversa genera menor penetración, cordones anchos y soldaduras muy limpias. Cuando se trabaja con polaridad inversa se necesitan diámetros de electrodo mayores. Por otra parte, la corriente alterna combina las ventajas de ambas.

Para el material de aporte que se va a utilizar (acero al carbono) el tipo de corriente más adecuado es la corriente continua con polaridad directa. El equipo de soldadura presentado en el apartado “4.2.1. *Equipo de soldadura*” permite soldar con este tipo de corriente, pero no permite soldar con corriente alterna.

#### 4.2.4 Electrodo de tungsteno

Los electrodos de soldadura TIG son de tungsteno o de tungsteno aleado (entorno al 1% y 2%) con torio, zirconio, cerio o lantano. El tungsteno es perfecto para electrodos no consumibles, ya que funde a elevada temperatura (3422 °C). Los electrodos de tungsteno aleado pretenden mejorar las cualidades del tungsteno puro permitiendo mejor estabilidad de arco, mayor duración de afilado, menor contaminación y mayor facilidad de cebado. Los electrodos son identificados mediante un código de color. La clasificación de los distintos electrodos según norma ISO 6848 [28] se muestra en la siguiente *Tabla 6*.

Electrodos de tungstenos según Norma ISO 6848 [28]				
Designación	Composición	Color identificativo	Tipo de corriente	Metales
WP	Tungsteno puro	Verde	AC	Aluminio, Magnesio.
WC20	2% Cerio	Gris	AC/DC	Apto para la mayoría de los metales.
WL10	1% Lantano	Negro	AC/DC	Destinados al corte y soldadura de Acero, Aluminio, Níquel, Titanio, Cobre.
WL15	1,5% Lantano	Oro	AC/DC	Acero, Acero inoxidable, Níquel, Titanio.
WL20	2% Lantano	Azul	AC/DC	Aceros, Aceros inoxidables, Aluminio, Níquel, Titanio, Magnesio, Cobre.
WS2	Tierras raras	Turquesa	AC/DC	Acero, Níquel, Titanio, Cobre, Aluminio.
WZ3	0,3% Zirconio	Marrón	AC	Aluminio
WZ8	0,8% Zirconio	Blanco	AC	
WT10	1% Torio	Amarillo	DC	Acero, Acero inoxidable, Níquel, Titanio, Cobre.
WT20	2% Torio	Rojo	DC	
WT30	3% Torio	Lila	DC	
WT40	4% Torio	Naranja	DC	

Tabla 6: Clasificación de los electrodos de tungsteno según norma ISO 6848 [28].

Dependiendo del tipo de corriente y del material a soldar se utiliza un tipo de electrodo u otro. Cabe destacar que el torio está siendo prohibido en diversos países por su radioactividad y sus peligros asociados. Por tanto, hay que evitar la utilización de electrodos aleados con torio.

Dependiendo del tipo de electrodo, de la intensidad de corriente y de la penetración deseada; se debe utilizar un diámetro u otro. En la siguiente *Tabla 7* se muestran los diámetros más comunes a utilizar según la intensidad de corriente. Los valores mostrados son orientativos y pueden variar ligeramente dependiendo del tipo de electrodo.

<b>Diámetro del tungsteno según la corriente a utilizar</b>		
<b>Diámetro Electrodo [mm]</b>	<b>Corriente Continua Polaridad Directa [A]</b>	<b>Corriente Continua Polaridad Inversa [A]</b>
<b>0,3</b>	0,1-15	No aplicable
<b>0,5</b>	5-20	No aplicable
<b>1,0</b>	15-80	No aplicable
<b>1,6</b>	70-150	10-20
<b>2,4</b>	150-250	15-30
<b>3,2</b>	250-400	25-40
<b>4,0</b>	400-500	40-55
<b>4,8</b>	500-750	55-80
<b>6,4</b>	750-1000	80-125

*Tabla 7: Diámetros de electrodos de tungsteno según la intensidad de corriente. Fuente: SMP [29].*

Por las características del proyecto, los electrodos a utilizar son los del tipo WL15 y WL20 con diámetros de 1,6 ó 2,4 mm dependiendo de los parámetros de soldadura utilizados y siempre siguiendo las recomendaciones del fabricante. Los electrodos con contenido de torio quedan totalmente descartados por seguridad.

Otro de los aspectos importantes respecto a los electrodos es su afilado. Con corriente alterna el afilado de la punta debe ser redondeado y con corriente continua el afilado debe ser puntiagudo. Los electrodos deben afilarse en dirección longitudinal, nunca de forma transversal. Dependiendo del tipo de electrodo y de la corriente, el ángulo de afilado será mayor o menor. Como norma general, se afila el electrodo de modo que la punta tenga una longitud total de dos veces el diámetro del electrodo. La punta debe truncarse ligeramente.

#### 4.2.5 Antorcha TIG

La antorcha TIG que se va a utilizar en este proyecto es el modelo SR-26V D35/50 de la casa Solter. Dispone de una longitud de cable de 4 metros y un conector dinse 35-50. La antorcha es compatible con el equipo de soldadura. Tiene una longitud desde el mango hasta su extremo de 250 mm. La antorcha posee un mando para regular el paso del gas de protección. En este caso, la bombona de gas va directamente conectada a la antorcha sin pasar por el equipo de soldadura. En la siguiente *Figura 33* se muestran la antorcha TIG y el cable de masa. La fotografía de la izquierda muestra la antorcha TIG SR-26V y la fotografía de la derecha muestra la pinza de masa.



*Figura 33: Fotografías de la antorcha y del cable de masa. Fecha: 21/02/2020.*

Las antorchas TIG están compuestas por las partes que se muestran en la *Figura 34*.



*Figura 34: Piezas principales de una antorcha TIG, con y sin difusor de gas. Fuente: Maquisol [30].*

Las principales partes de una antorcha TIG son: la copa cerámica (tobera o difusor), el difusor, el sujeta electrodos o mordaza, el protector térmico superior, el capuchón, el electrodo y la propia antorcha.

Existen dos configuraciones para las antorchas TIG dependiendo del tipo de difusor a utilizar, ambas se muestran en la *Figura 34*. Existe el difusor más común y, por otra parte, existen los difusores nombrados LENS que aportan ventajas frente a los difusores convencionales. Los difusores LENS aportan el gas a la soldadura de una forma más suave, concentrada y con menores turbulencias; lo que repercute en la calidad de la soldadura. Con este tipo de difusores, se protege mejor el baño de fusión, se obtienen soldaduras de mayor calidad, se consume menos gas, se permite soldar con una separación

de la boquilla de hasta 25 mm y, también, se mejora la accesibilidad y visión durante el soldeo, ya que permite extraer más el electrodo [31].

En difusores LENS, las copas cerámicas (toberas y difusores) deben adaptarse al tipo de difusor y diámetro de electrodo. Por el contrario, el difusor convencional es, generalmente, compatible con todos los tipos de copas cerámicas. Pese a las ventajas del difusor tipo LENS, en este proyecto, se utilizarán difusores convencionales, ya que son los disponibles.

Existen diversos tipos de copas cerámicas (tobera o difusor). Estas copas vienen identificadas con un número que indica el diámetro interno de la salida de gas en sistema imperial (pulgadas), cada unidad de este número representa 1/16 de pulgada. Si se quiere saber el diámetro interno en milímetros, por ejemplo, de una copa del número 4, se debe realizar la siguiente operación:

$$\text{Copa número } 4 \cdot \frac{1}{16} \text{ de pulgada} \cdot \frac{25,4 \text{ mm}}{1 \text{ pulgada}} = 6,35 \text{ mm}$$

Es decir, si se desea conocer el diámetro interno de la copa en milímetros, se debe multiplicar el número indicado en la copa por 1,5875. Tras el número de copa pueden aparecer letras (L, XL, XXL). Estas letras indican la longitud de la tobera. Las más largas se utilizan en zonas de difícil acceso. La elección de un tipo de tobera u otro dependerá del electrodo a utilizar, de la técnica de soldadura (manual, automática), del caudal de gas protector y de la longitud del electrodo.

Como regla general, el diámetro interno de la tobera debe ser 3 veces el diámetro del electrodo. En difusores convencionales el electrodo no debe sobresalir más del diámetro interno de la copa cerámica o, lo que es equivalente, 3 veces su diámetro. En difusores tipo LENS la longitud del electrodo puede aumentar respecto a los difusores convencionales, es decir, el electrodo puede sobresalir una longitud de hasta 6 veces su diámetro. Cuando se está soldando, se recomienda una distancia de arco de entre una y 2 veces el diámetro del electrodo. La mejor forma de acertar con la configuración de la antorcha es guiarse de las tablas existentes. Por ejemplo, en la siguiente *Tabla 8* se muestran algunos datos útiles.

Parámetros orientativos de la copa cerámica a utilizar				
Diámetro tungsteno [mm]	Diámetro boquilla [mm]	Número de boquilla	Número de boquilla	Caudal de gas [l/min]
1,5	De 6 a 10	4, 5, 6	4	4,7-6,6
2,5	De 10 a 12	6, 7	5	5,2-7,0
3	De 12 a 14	7, 8, 9	6	5,6-7,5
5	De 14 a 20	9, 10, 11, 12	7	6,1-8,0
			8	8,0-9,4
			10	8,0-9,4

*Tabla 8: Parámetros orientativos en la elección de la copa cerámica para antorcha TIG según diámetro de electrodo y caudal de gas protector. Fuente: Giachino, J. W.; Weeks; 2003. [10]*

En este proyecto, se utilizarán copas cerámicas del número 5 o 6. Dependiendo de las condiciones de soldadura (amperaje, material de soldeo, caudal de gas, electrodo de tungsteno, condiciones ambientales, etcétera) se deberán adaptar algunos de los

parámetros. En el anexo “A.4. *Parámetros recomendados en soldadura TIG de aceros*” se muestran tablas con parámetros adecuados para el soldeo de aceros al carbono y aceros inoxidables. La determinación adecuada de los parámetros deberá ser contrastada de forma experimental, ya que los resultados obtenidos dependen del equipo de soldadura y, incluso, de las condiciones ambientales.

#### 4.2.6 Equipo gas protector

En soldadura TIG los gases de protección deben ser inertes. Los gases utilizados son el argón y el helio o una mezcla de ambos. El argón tiene una densidad 1,4 veces mayor que el aire y unas 10 veces mayor que el helio. Gracias a su mayor densidad proporciona una mejor protección a la soldadura y el arco suele ser más estable y fácil de cebar. Generalmente, se utiliza más el argón debido a su precio. En soldaduras automáticas o en soldaduras donde se requiera una alta velocidad de soldadura suele ser conveniente utilizar helio, ya que, para una determinada intensidad, la tensión del arco es mayor [10].

En este proyecto, se va a utilizar argón puro. Las bombonas de tamaño estándar requieren unos cuidados específicos y, en ocasiones, se depende de una empresa suministradora para la obtención del gas. En el laboratorio, no se dispone de bombonas de argón y realizar la contratación de éstas es complejo. Existen en el mercado bombonas de pequeño tamaño que no requieren de contrato y, éstas son las que se van a utilizar.

La bombona que se va a utilizar se muestra en la siguiente *Figura 35*, en la fotografía de la derecha pueden observarse sus especificaciones. Este tipo de bombonas sirven para hacer pruebas o pequeñas soldaduras, pero su duración es corta y su precio es elevado comparado con las bombonas estándar. Para este tipo de proyecto será suficiente para realizar unas pruebas, pero es aconsejable conseguir bombonas de mayor tamaño.



*Figura 35: Bombona de argón puro de reducidas dimensiones (2,2 Litros). Fecha: 21/02/2020.*

Existen equipos que disponen de una electroválvula para el control del flujo de gas, estos equipos permiten ajustar el pre-gas y el post-gas en el inicio y final de la soldadura, así como, las pendientes de la corriente en inicio y fin del cordón y, también, las pulsaciones



en la corriente durante el proceso. Este tipo de equipos de soldadura, generalmente, son de uso profesional y de un coste elevado. El equipo disponible mostrado en el apartado “4.2.1. *Equipo de soldadura*” no tiene electroválvula ni ninguna de estas funciones; el gas va conectado directamente a la antorcha TIG.

Para la conexión del gas de protección a la antorcha deben usarse: reductor de presión, caudalímetro y elementos de conexión (racores, abrazaderas y mangueras). El caudalímetro puede presentarse junto con el reductor de presión o de forma separada. En la siguiente *Figura 36* se muestran los componentes para el control del flujo de gas.



*Figura 36: A la izquierda se muestra un ejemplo de un reductor de presión y a la derecha se muestra un ejemplo de un caudalímetro manual. Fuente: [32] y [33].*

Los pasos para la correcta regulación del flujo de gas protector son: abrir la llave de paso de la antorcha, colocar el caudalímetro de forma vertical en la copa cerámica de la antorcha, abrir poco a poco la llave del reductor de presión hasta ajustar el caudal necesario y cerrar la llave de paso de la antorcha. Tras realizar estos pasos, el caudal de gas está ajustado y después de soldar se puede cerrar el paso de gas a través de la antorcha sin desajustar el caudal.

Una insuficiencia de caudal puede provocar una falta de protección del baño de fusión y, un exceso de caudal puede provocar turbulencias en el flujo de gas. Estas turbulencias introducen aire en el flujo y desplazan el gas protector desprotegiendo el baño de fusión y causando incrustaciones y oxidaciones en el cordón. Por tanto, el caudal de aire debe ajustarse a los valores recomendados y comentados en la anterior *Tabla 8*. Para la realización de este proyecto el caudal de gas recomendado se sitúa entre 4 y 6 l/min.

### 4.3. Soporte de la antorcha

En este apartado, se muestra el diseño del soporte de la antorcha teniendo en cuenta aspectos como: la posición de soldadura y del material de aporte, la protección del baño de fusión, la protección del material de aportación y el método de cebado del arco eléctrico, entre otros.

Para la obtención de un buen cordón de soldadura es fundamental trabajar con la correcta posición de soldeo. En soldaduras bajo gas protector, el ángulo de la antorcha respecto a la vertical debe ser moderado, ya que, a ángulos elevados, la zona protegida por el gas inerte cambia hacia a una forma más alargada que puede causar una desprotección en ciertas zonas del baño de fusión. Además, la excesiva inclinación y un excesivo caudal de gas pueden ocasionar turbulencias en el flujo de gas de protección. Estas turbulencias



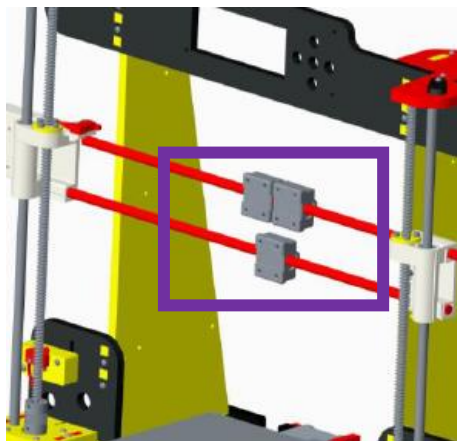
provocan la mezcla del gas protector con el aire y, consecuentemente, generan oxidaciones en el cordón. En soldadura GTAW se recomiendan ángulos de antorcha pequeños de entre  $0^\circ$  y  $15^\circ$  respecto a la vertical, o lo que es lo mismo, de entre  $90^\circ$  y  $75^\circ$  respecto a la pieza.

En este caso en concreto, la máquina de fabricación aditiva diseñada solo consta de 3 ejes de movimiento X, Y y Z, por lo que, no se tiene posibilidad de cambiar el ángulo de soldadura constantemente. Como los cordones de soldadura se aplicarán en distintas direcciones y sentidos dependiendo de la pieza a fabricar y el ángulo de la antorcha va a permanecer invariable, se ha estimado que la mejor opción es diseñar un soporte para la antorcha que permita la sujeción de ésta de forma perpendicular al material base, es decir, con una inclinación de  $0^\circ$  respecto a la vertical.

Otro de los elementos importantes en el diseño es la forma de aportar el material. El material de aporte debe quedar cubierto bajo el chorro de gas protector para evitar que éste se oxide. Lo más recomendable es que el material de aporte forme un ángulo de  $15^\circ$  respecto al metal base.

Conocer las dimensiones de la antorcha y del carro de la máquina es fundamental para diseñar el soporte de la antorcha. Debido a la situación actual causada por el COVID-19 la toma de medidas no se ha podido realizar. De todas formas, se disponen de unas dimensiones generales de la antorcha y el diseño del soporte sigue unas líneas de diseño universal, por lo que se facilita la adaptación de cualquier antorcha al soporte diseñado.

El soporte va anclado a los rodamientos lineales de la máquina. El carro, por tanto, va a desplazarse a lo largo de los ejes X y Z de la máquina. En la siguiente *Figura 37* se muestra mediante un recuadro morado la localización en la cual se ancla el soporte de la antorcha. Las dimensiones de los correspondientes rodamientos lineales se exponen en el anexo “A12. Dimensiones rodamientos lineales SCS8UU”.



*Figura 37: Mediante un recuadro morado se indican los anclajes del soporte con la máquina. Fuente: Manual de montaje de la impresora Anet A8 [25].*

Se debe procurar realizar un diseño del soporte compacto para perder el mínimo volumen de impresión posible. Hacer pasar la antorcha de soldadura entre los dos ejes de 8 mm que se muestran en la *Figura 37* es inviable, ya que por esa localización pasan las correas transmisoras del movimiento del carro (no están representadas en la figura). La mejor

opción es hacer pasar la antorcha justo por debajo de los ejes. Es por este motivo que, en el diseño, la antorcha de soldadura está justo por debajo de los ejes del carro. Se ha procurado minimizar la distancia de la cota más baja del soporte al eje, así se evita perder un volumen de impresión excesivo. En la siguiente *Figura 38* se muestra el diseño obtenido para el soporte de la antorcha.

Las uniones desmontables del soporte presentan la tornillería estandarizada que se muestra en la siguiente *Tabla 9*.

Tornillería del soporte de la antorcha			
Elemento	Cantidad	Dimensiones	Estandarización
Cabeza hueca hexagonal	7	M4*12 mm	DIN-912/ISO-4762
Cabeza hueca hexagonal	12	M4*10 mm	DIN-912/ISO-4762
Cabeza hueca hexagonal	4	M3*5 mm	DIN-912/ISO-4762
Cabeza hueca hexagonal	3	M3*12 mm	DIN-912/ISO-4762
Cabeza hueca hexagonal	4	M3*30 mm	DIN-912/ISO-4762

*Tabla 9: Tornillería estandarizada del soporte de la antorcha.*

Los esfuerzos a los que va a estar expuesta la tornillería son mínimos, es decir, el sistema está sobredimensionado en este aspecto. Por tanto, existe cierta flexibilidad en el momento de escoger la clase o grado de tornillo según norma UNE-EN ISO 898-1 [34] (aceros al carbono y aceros aleados) o norma UNE-EN ISO 3506-1:2010 [35] (aceros inoxidables resistentes a la corrosión). De este modo, se escogerá la clase de tornillo con mayor disponibilidad, en este caso se ha estudiado la posibilidad de utilizar tornillería grado 8.8 o A4 A-70. El entorno de soldadura puede generar corrosiones en la tornillería, por este motivo, será preferible escoger tornillería de aceros inoxidables tipo A4.

Es fundamental y de vital importancia calcular el par de apriete adecuado para cada uno de los elementos de unión. El cálculo del par de apriete está basado en la norma UNE-17108:1981 [36]. En el anexo “A9. Clasificación de la tornillería y cálculo del par de apriete” se encuentra toda la información necesaria a cerca de las distintas clases de los elementos de unión y del cálculo del par de apriete, según norma. En la siguiente *Tabla 10* se resumen los pares de apriete adecuados para la tornillería de este soporte y, también, se incluyen los métricos de la tornillería utilizada en el alimentador del hilo, el cual se muestra en el siguiente apartado “4.4. Equipo alimentador del material de aporte”.

Par de apriete para la tornillería de los elementos diseñados			
Tornillo		Calidad 8.8 $\mu = 0,11$	Calidad A-70 $\mu = 0,11$
Métrica	Paso	Par de apriete [N·m]	
M3	0,5	1,0	0,73
M4	0,7	2,4	1,7
M6	1	8	5,6
M8	1,25	19	14

*Tabla 10: Par de apriete de la tornillería utilizada en este estudio. Fuente: norma UNE-17108:1981 [36].*

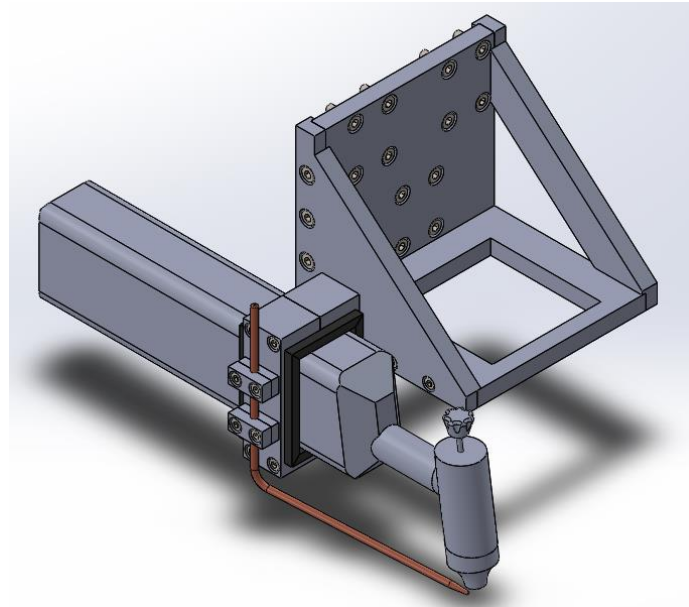


Figura 38: Imagen del diseño CAD del soporte de la antorcha de soldadura GTAW.

En este caso, el ángulo de aporte de material más óptimo obtenido respecto al material base es de aproximadamente  $12^\circ$ . El hilo de aporte llega hasta su punto de deposición guiado por un tubo. Este tubo permite al material de aporte protegerse bajo el flujo de gas y llegar hasta el arco para ser fundido y, posteriormente, ser depositado. En la siguiente Figura 39 se puede observar el sistema de aportación de material.

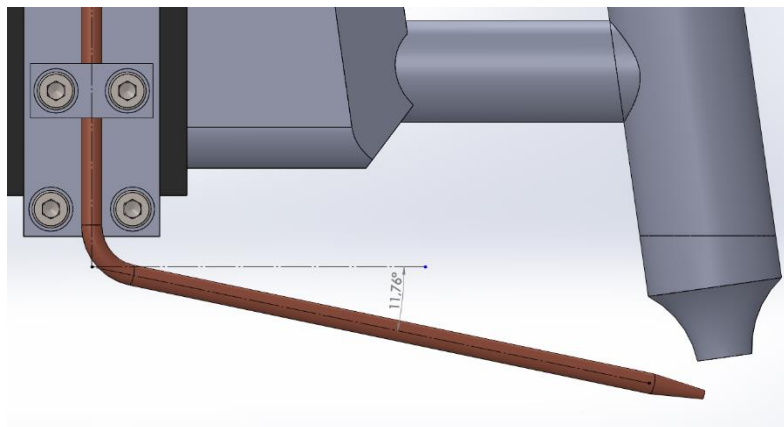


Figura 39: Imagen CAD que muestra el tubo guía del material de aporte. Éste llega hasta la boquilla de la antorcha GTAW con el fin de guiar y proteger el material de aportación. En la imagen se muestra el ángulo de deposición del material de aporte respecto al metal base.

La forma de cebado del arco también afectará al diseño del soporte. En este caso y, como ya se comentó anteriormente, el método de cebado del equipo de soldadura es *Lift-Arc*. Esta metodología de cebado implica que la antorcha debe tocar el material base para iniciar el arco. Con el fin de absorber los posibles pequeños impactos del cebado, se ha añadido entre la antorcha GTAW y el soporte una pieza de caucho/goma. Dicha pieza se muestra en la Figura 40. Esta pequeña pieza de caucho no sólo minimiza los efectos de los impactos, también, mejora la sujeción de la antorcha al soporte y permite un diseño con capacidad de adaptarse a distintas antorchas y, por tanto, un diseño más universal.

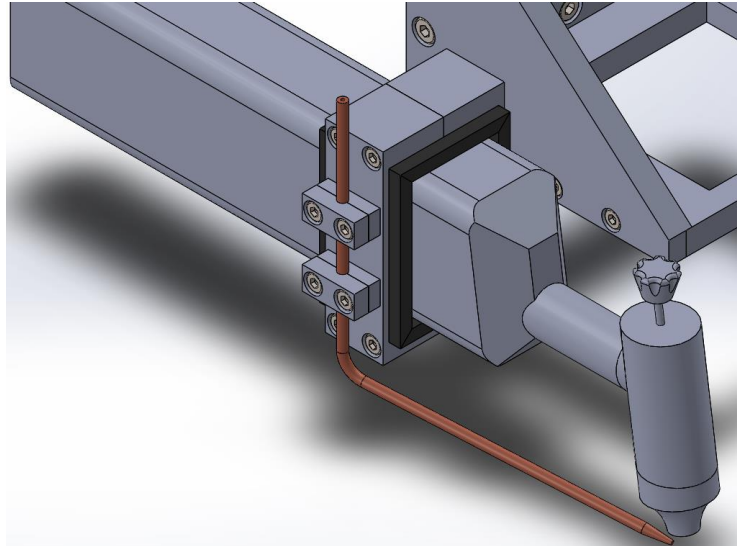


Figura 40: Imagen CAD en la que se puede observar la pieza de caucho (se muestra coloreada de negro).

Los planos de dicho soporte se pueden consultar en el archivo: *Planos*. La masa total de las piezas del soporte es de 451,71 gramos. Para el cálculo se ha considerado que el material de las piezas es aluminio 6061 de densidad  $2.700 \text{ kg/m}^3$  y que el material del tubo guía del material de aporte es cobre de densidad  $8.900 \text{ kg/m}^3$ . Además, hay que añadir el peso de la tornillería, éste es de 7,08 gramos. Aproximadamente, se obtiene un peso total para el soporte de la antorcha de 460 gramos. En este cómputo no se incluye la masa de la antorcha GTAW ni de la pieza de caucho. Se considera una masa válida y en concordancia con la entrega de par y potencia de los motores paso a paso teniendo en cuenta el tipo de transmisión de los ejes.

Como las velocidades en procesos de soldeo son bajas (en torno a 1-10 mm/s), las inercias del soporte son adecuadas y no presentan, inicialmente, problemática. En las siguientes *Figura 41* y *Figura 42* se puede observar la posición del centro de masas del soporte.

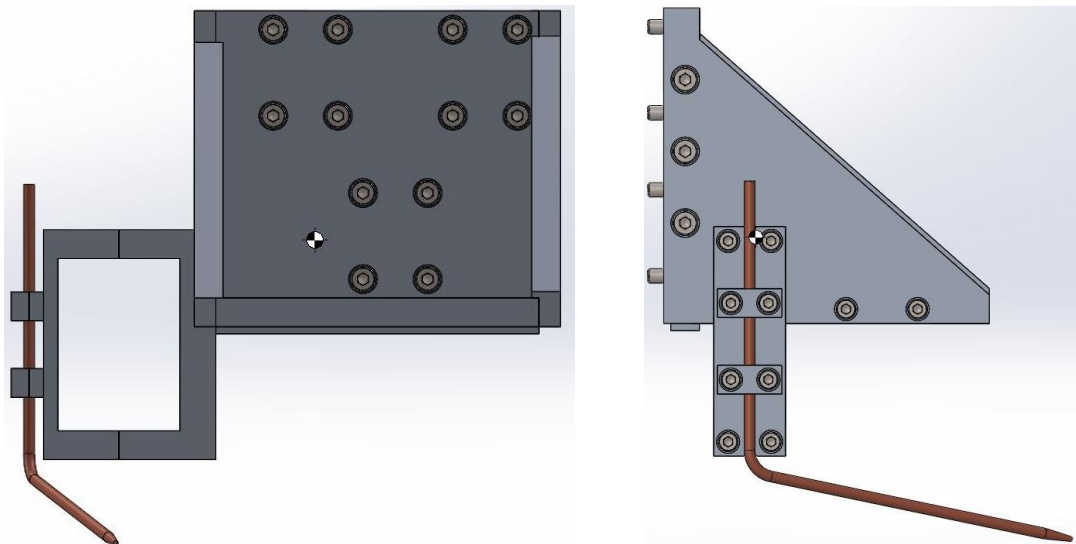
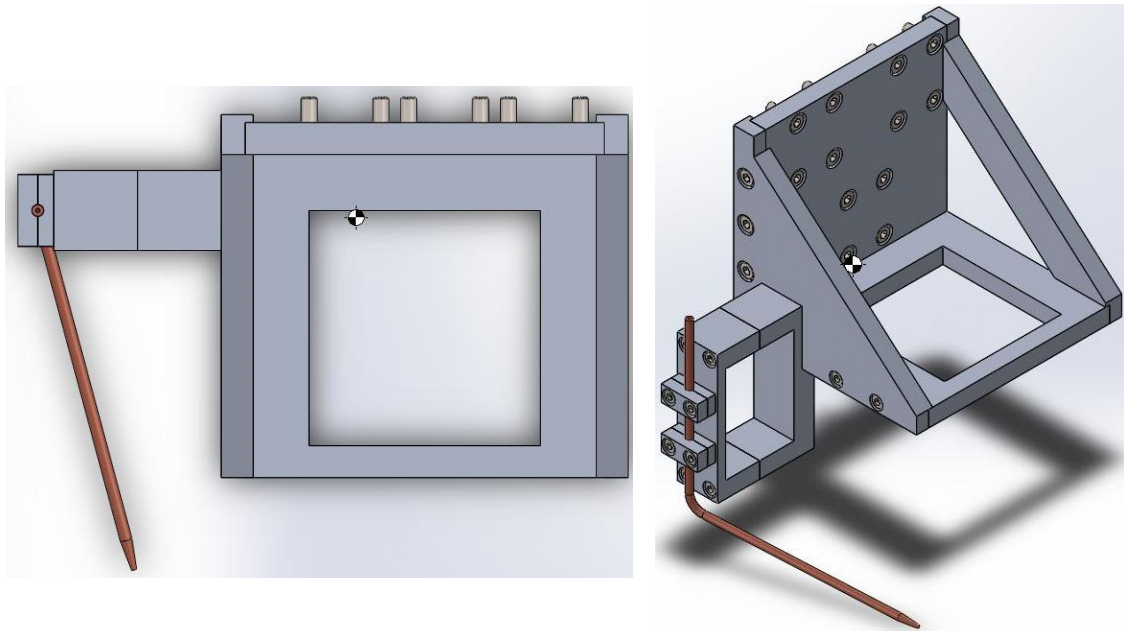


Figura 41: Posición del centro de masas del soporte de la antorcha. Vista frontal y de perfil.



*Figura 42: Posición del centro de masas del soporte de la antorcha. Vista superior e isométrica.*

El diseño realizado permite pequeñas variaciones en caso de observar problemáticas en el funcionamiento de la máquina. En el diseño, las cabezas de la tornillería quedan embutidas dentro de las placas del soporte. Si fuera necesaria una reducción del peso del soporte, la tornillería de cabeza hexagonal hueca DIN-912/ISO-4762 puede ser sustituida por tornillería de cabeza avellanada hexagonal hueca DIN-7991/ISO-10642. Este cambio en la tornillería permite reducir el espesor de las placas de 8 mm a 6 mm, obteniendo un peso total aproximado de 360 g. Esto supone un decremento de peso de 100 g respecto al diseño presentado o, lo que es lo mismo, una reducción del 22% en el peso del soporte de la antorcha. Como puede observarse, es una reducción importante en el peso. Así mismo, esta reducción de material también repercute positivamente en la reducción del coste de fabricación.

En el diseño se ha optado por la obtención de un soporte de gran rigidez y robustez y, se ha obtenido una masa considerada apta para el funcionamiento de la máquina. De todas formas, se presenta como segunda opción, una modificación de dicho soporte que reduce el peso de éste y que permite un mayor aprovechamiento de la potencia de los motores. También, se reduce el coste de fabricación. Estas mejoras son a costa de reducir, también, la rigidez de dicho soporte.



#### 4.4. Equipo alimentador del material de aporte

La soldadura GTAW permite realizar soldaduras con y sin material de aporte. En el caso que nos ocupa, el proceso requiere de aportación de material, ya que de lo contrario no sería un proceso de fabricación aditiva y, no existiría forma alguna de generar las piezas. Este material de aporte puede presentarse tanto en forma de hilo como de varillas rígidas. Por la facilidad de automatización, se ha escogido utilizar hilo. Anteriormente, en el apartado “4.2.2. *Material de aporte*” se presentó el material de aportación a utilizar y se describieron sus características. A continuación, se detalla el diseño del equipo alimentador del material de aporte.

Los sistemas de alimentación del hilo pueden dividirse en tres: sistemas de empuje, sistemas de arrastre y sistemas de arrastre-empuje. De forma resumida, cada uno de ellos se diferencia en la forma de mover el alambre y en la posición del motor que gestiona el movimiento.

En los sistemas de empuje, el motor se sitúa fuera de la antorcha y el hilo es, como dice el nombre, empujado. Estos sistemas tienen la ventaja de ahorrar peso en la antorcha, pero presentan problemas en el transporte del hilo hasta el extremo de la antorcha. El transporte del hilo hasta la antorcha requiere de fundas más resistentes y, éstas ofrecen mayor rigidez en el cableado. Con este sistema, en caso de obstaculización del movimiento, pueden producirse enredos y anidado del hilo fácilmente. Es un sistema más adecuado para hilos rígidos, como el acero, aunque también admite hilos más flexibles, como el aluminio. La distancia desde la bobina hasta la antorcha se ve reducida con este sistema (como máximo 3-4 metros).

Por otro lado, el sistema de arrastre, tira del hilo desde la antorcha. Generalmente, se utilizan motores más pequeños que giran a más revoluciones con el fin de reducir peso. De todas formas, la adición de peso a la antorcha puede acarrear incomodidad y ciertas dificultades para soportarla y moverla. Con este sistema se puede mover incluso alambre flexible a largas distancias.

Por último, el sistema de arrastre-empuje combina los dos sistemas. Se basa en añadir un motor cerca de la bobina del hilo y otro en la antorcha que trabajan de forma sincronizada. Este tipo de sistema es más fiable, permite la utilización de todo tipo de hilos y permite transportar el hilo a más distancia. Por el contrario, es un sistema más complejo y caro.

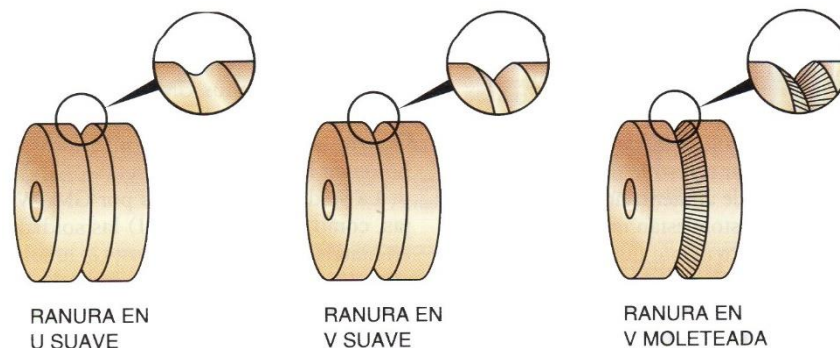
Tras valorar las ventajas y los inconvenientes de cada sistema, se ha decidido que para este proyecto el mejor sistema es el de tipo empuje o, también conocido en impresión 3D como, *bowden*. La principal razón es la facilidad de adecuación a la maquinaria existente. Los motores paso a paso de la impresora Anet A8 tienen un par máximo de 0,4 Nm y, en caso de acoplar una antorcha muy pesada y un sistema de tracción del hilo muy pesado y rígido, existe la posibilidad de no disponer del par necesario para mover correctamente la antorcha de soldadura. Los sistemas de arrastre y arrastre-empuje necesitan de un motor cerca de la antorcha y, consecuentemente, esto incrementa el peso de ésta. Si se incrementa el peso de la antorcha, se incrementa, también, el peso y la inercia del carro de la máquina; siendo necesario un incremento del par y potencia de los motores y, también, un refuerzo de la estructura. Para asegurar la correcta adaptación del sistema de



alimentación del hilo, se han descartado estos dos sistemas y se ha optado por el sistema de empuje.

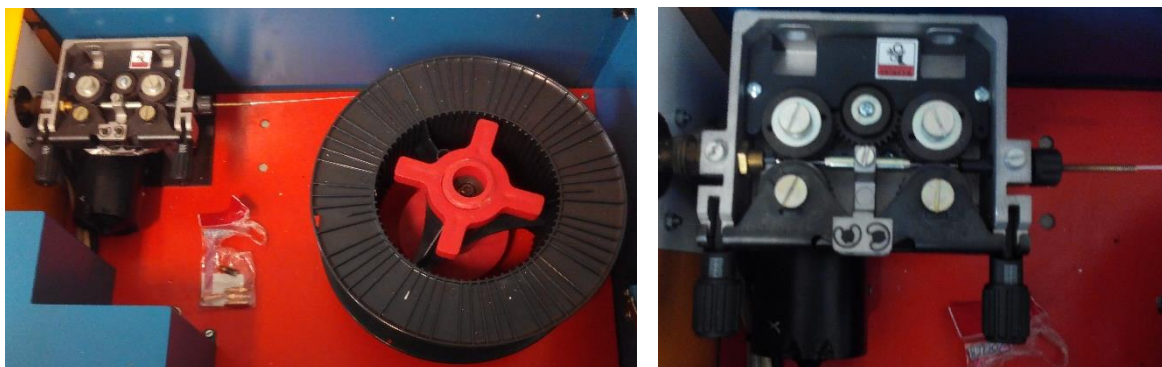
Los sistemas de empuje, generalmente, se componen de un conjunto de rodillos o roldanas que presionan el hilo y que generan la fricción necesaria para arrastrarlo hasta el lugar de deposición. Los rodillos están ranurados y calibrados para cada diámetro de hilo. Las ranuras más comunes son las que tienen formas en U y V. Estas ranuras pueden estar o no moleteadas. El moleteado sirve para generar mayor fricción, pero en hilos blandos puede causar deformaciones. Para hilos blandos, como el aluminio, la mejor opción son roldanas en U y sin moleteado. De esta forma, los hilos sufren la menor deformación posible y se reducen las posibilidades de generar problemas. Por otro lado, los hilos más rígidos, como los aceros y aceros inoxidables, permiten el uso de ranuras en V capaces de mejorar el arrastre. Los distintos tipos de rodillos pueden observarse en la siguiente *Figura 43*.

El tipo de rodillo más adecuado para el material a utilizar (acero al carbono) es el rodillo en V moleteado. Este tipo de rodillo es capaz de generar más fricción y en hilos rígidos no causa deformaciones que afecten al comportamiento de éste.



*Figura 43: Rodillos o roldanas de alimentación. Fuente: Fig. 10-30. Pág. 235. Jeffus, L. 2009. [22].*

A continuación, en la *Figura 44*, a modo de ejemplo, se muestra el alimentador de hilo de un equipo de soldadura GMAW preparado para hilo de aluminio. En este caso en concreto, se dispone de 4 rodillos que presionan y arrastran el hilo.



*Figura 44: Ejemplo de un alimentador de hilo de un equipo GMAW preparado para hilos blandos de aluminio.*

Para el diseño del alimentador del hilo se deben tener en cuenta las dimensiones y características del motor a utilizar. En este caso, se va a utilizar el motor del extrusor de la impresora. Éste es un motor paso a paso con un par de 0,4 Nm. Este tipo de motor es capaz de girar a la velocidad necesaria sin necesidad de acoplar trenes de engranajes (las velocidades de alimentación oscilan entre 30 mm/s y 120 mm/s). La velocidad del motor se podrá variar y controlar durante todo el proceso y, ésta será establecida en la generación de las trayectorias de la máquina. Las dimensiones y especificaciones del motor paso a paso se muestran en el anexo “A6. Especificaciones motor paso a paso”. En el correspondiente anexo también se muestran algunas fotografías de dicho motor.

El mecanismo de tracción del hilo diseñado está compuesto por dos roldanas, una de ellas tractora y la otra conducida. La roldana tractora se conecta directamente al eje motor mediante un extensor que incorpora los elementos necesarios para la transferencia del movimiento. El extensor se vale de una chaveta paralela DIN 6885 B de longitud 1,5 veces el diámetro eje para la transmisión del movimiento. Las dimensiones y especificaciones de la chaveta estandarizada se pueden consultar en el anexo “A8.4. Chaveta paralela s/DIN-6885 B”. La roldana conducida está introducida en un eje que permite la rotación a través de dos rodamientos rígidos de bolas situados en sus extremos. La carga que deben soportar los rodamientos es de tipo radial, por ende, los rodamientos rígidos de bolas son adecuados. Consultar especificaciones del rodamiento en el anexo “A10. Especificación técnica rodamiento W 61700 X-2RS1”.

También se ha incorporado al alimentador del hilo un soporte para carretes de medidas estándar. Las dimensiones estándar de los carretes se pueden consultar en el anexo “A7. Dimensiones típicas del carrete de hilo de soldadura”.

Los elementos de unión del alimentador de hilo son, mayormente, tornillos y, las especificaciones de éstos, según estandarización, se pueden consultar en el anexo “A8. Elementos de unión desmontable”. Los distintos elementos de unión insertados en el diseño del alimentador de hilo se pueden consultar en la siguiente *Tabla 11*.

Tornillería del alimentador de hilo			
Elemento	Cantidad	Dimensiones	Estandarización
Cabeza hueca hexagonal	10	M3*10 mm	DIN-912/ISO-4762
Cabeza hueca hexagonal	10	M3*6 mm	DIN-912/ISO-4762
Cabeza hueca hexagonal	4	M3*16 mm	DIN-912/ISO-4762
Cabeza avellanada hexagonal hueca	4	M8*20 mm	DIN-7991/ISO-10642
Cabeza avellanada hexagonal hueca	2	M6*16 mm	DIN-7991/ISO-10642
Cabeza hueca hexagonal	3	M3*12 mm	DIN-912/ ISO-4762
Tornillo de fijación con cabeza hexagonal hueca y copa en punta	1	M4*3 mm	DIN-916/ISO-4029
Tuerca ciega abombada	1	M8	DIN-1587

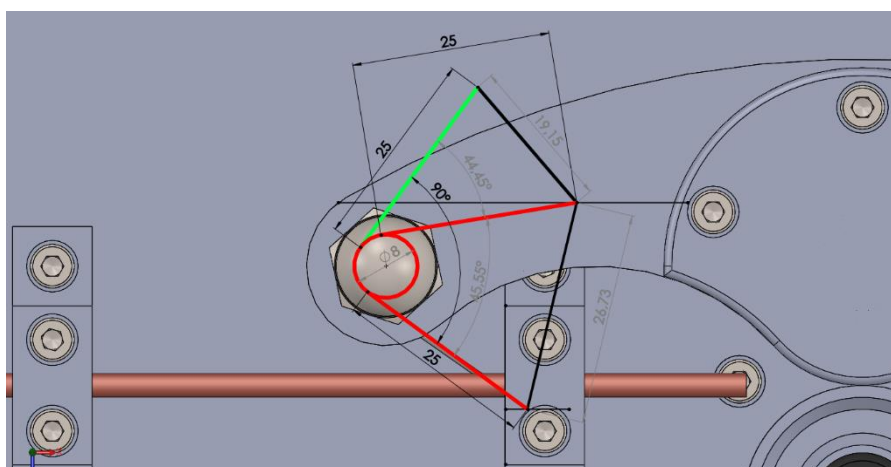
Tabla 11: Tornillería del alimentador de hilo.

En el anexo “A9. Clasificación de la tornillería y cálculo del par de apriete” se encuentra toda la información necesaria a cerca de las distintas clases de elementos de unión y del cálculo del par de apriete, según norma. En el apartado anterior “4.3. Soporte de la antorcha”, se muestra en la correspondiente *Tabla 10*, un resumen del par de apriete adecuado para la tornillería de este alimentador de hilo y del soporte de la antorcha.

Para facilitar la carga de hilo en el alimentador, se ha introducido un resorte de torsión capaz de mover el brazo que contiene la roldana tras ser liberado. Para el cálculo aproximado del muelle adecuado, se utiliza la ley de Hooke adaptada a resortes de torsión:

$$\tau = -\kappa \cdot \theta$$

Donde  $\tau$  es el momento de torsión en Nm,  $\kappa$  es la constante del muelle en Nm/rad. y  $\theta$  el ángulo de giro desde la posición original en radianes. Las características del resorte de torsión que se ha acoplado en el alimentador del hilo se muestran en el anexo “A11. Especificaciones resorte de torsión”. Para la elección de éste se ha tomado su constante de muelle  $\kappa = 0,73$  Nm/rad. y se han calculado los grados de compresión mediante el croquis mostrado en la siguiente *Figura 45*.



*Figura 45: Croquis resorte de torsión. Se puede observar, en verde, el resorte en posición de equilibrio y, en rojo, en posición de trabajo o comprimido. Se puede observar un ángulo de compresión de  $44,45^\circ \approx 0,78$  rad.*

Tomando los grados de compresión e introduciéndolos en la ecuación anterior obtenemos un momento de torsión de  $\tau = -0,56$  Nm (el signo negativo indica que el momento generado por el muelle es contrario a la dirección normal de giro). Conociendo la longitud de las patas del resorte (25 mm) podemos estimar la fuerza que se realiza en el punto de contacto y de forma perpendicular mediante la ecuación de momento:

$$M = r \times F$$

Operando, obtenemos una fuerza ejercida por el muelle de 22,4 N. Teniendo en cuenta que la masa aproximada del conjunto a mover es de 0,263 kg (brazo 140g, cobre roldana 27 g, roldana 80 g, tornillos 0,45 g y eje roldana 15 g) y que la fuerza de fricción es mínima e incluso despreciable, el resorte de constante  $\kappa = 0,73$  Nm/rad. es adecuado para la aplicación deseada, ya que es capaz de ejercer una fuerza levemente mayor al peso y rozamiento del conjunto. El muelle escogido cumple la norma DIN-2089 y su colocación se muestra en la siguiente *Figura 46*.

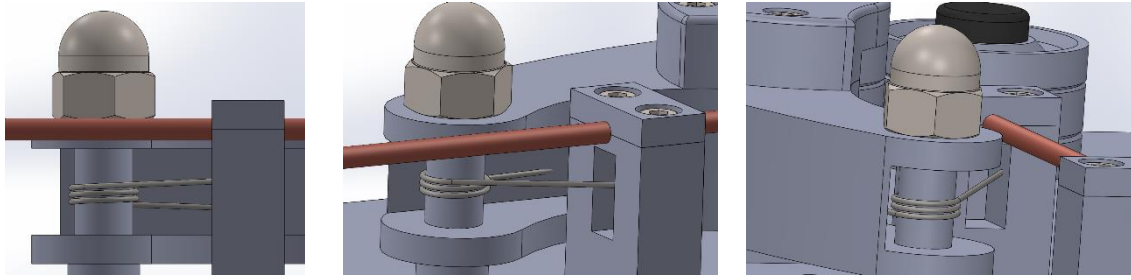


Figura 46: Imágenes CAD que muestran la colocación del muelle de torsión desde distintos puntos de vista.

Para facilitar el paso del hilo por las roldanas, se han diseñado unos tubos que guían el hilo por su trayectoria. Para transportar el hilo hasta el punto de deposición de material se debe acoplar un tubo lo suficientemente rígido para evitar deformaciones y enredos, pero a su vez, éste debe ser flexible para amoldarse al movimiento del cabezal de la máquina. Lo más recomendado es utilizar conductos específicos para hilo de soldadura como el mostrado en la *Figura 47*, pero en su defecto podrían utilizarse tubos tipo cuello de cisne o fundas de ciclismo del diámetro adecuado. Los tubos específicos para hilos de soldadura suelen estar compuestos por un alambre de acero enrollado, como un muelle, para aportar rigidez y flexibilidad y, por un recubrimiento de teflón, o similar, para facilitar el deslizamiento del material.

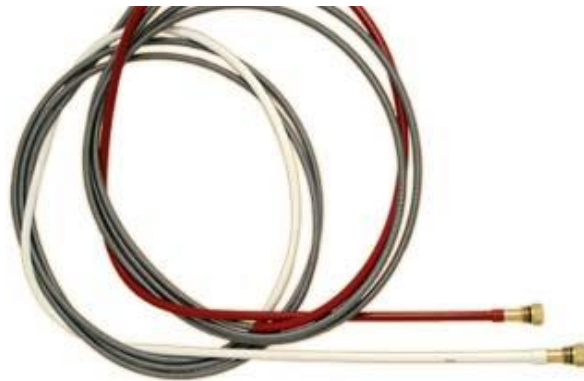


Figura 47: Conducto guía del hilo de soldadura para mover el hilo desde el alimentador hasta el cabezal de la máquina. Fuente: [37].

El dispositivo alimentador de hilo diseñado se muestra al completo en las siguientes *Figura 48* y *Figura 49*. Los planos pueden consultarse en el documento adjunto: *Planos*. Para el correcto funcionamiento del alimentador del hilo, es necesaria una buena alineación vertical y horizontal de las roldanas y del tubo guía del hilo, de lo contrario, el hilo puede desviarse, deslizarse de forma inadecuada y producir anidado. En la *Figura 50* se muestra la correcta alineación del dispositivo.

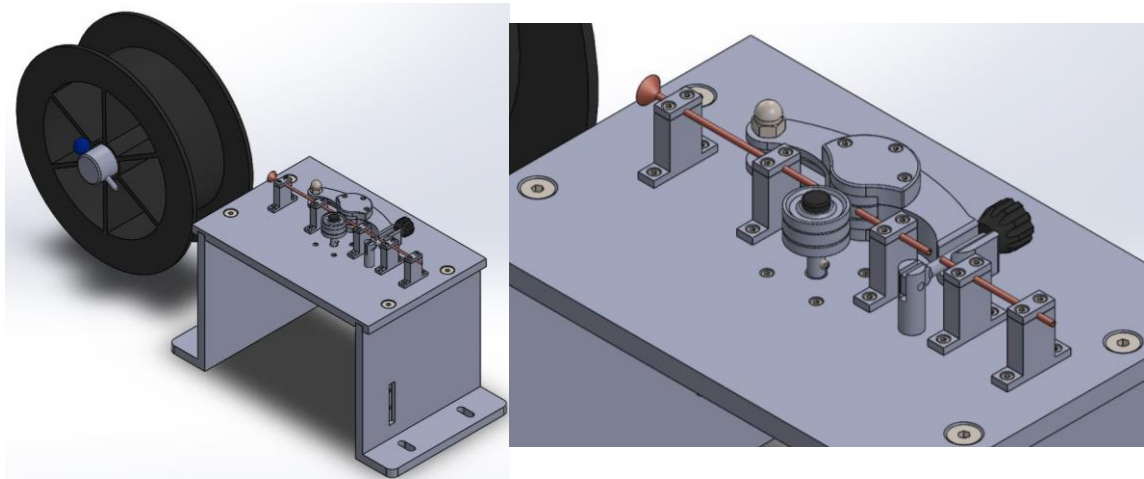


Figura 48: Vistas isométricas del diseño CAD del alimentador de hilo.

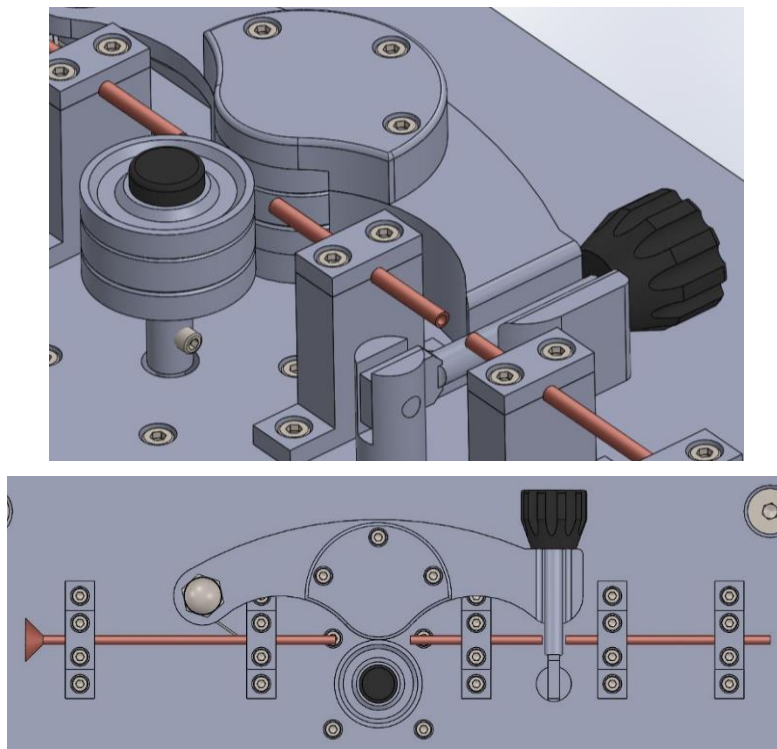


Figura 49: Vista CAD detallada de las roldanas y vista CAD superior del mecanismo del alimentador del hilo.

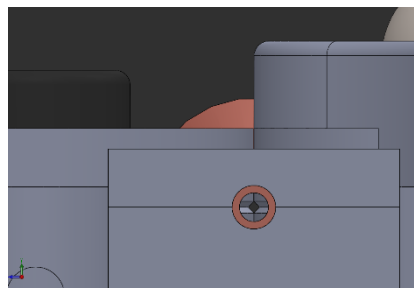


Figura 50: Vista del CAD de la correcta alineación vertical y horizontal del sistema de guiado del hilo. En la imagen se puede observar el tubo guía perfectamente alineado con las ranuras de las roldanas.



Para colocar el material de aporte en el alimentador de hilo, es necesario introducir el hilo a través de los tubos guía. Tras esta operación, se hace pasar el hilo entre las ranuras de las roldanas y se presiona el brazo que contiene la roldana conducida. Se fija el brazo y, a continuación, se enrosca la palometa de sujeción hasta realizar la presión adecuada sobre el hilo. Esta presión debe ser suficiente como para mover el hilo a través de todos los conductos sin dificultad, pero no debe ser excesiva, ya que se podrían producir deformaciones en el hilo.

#### **4.5. Protecciones**

Las dimensiones de la máquina de fabricación aditiva son reducidas, por tanto, los distintos componentes de ésta pueden verse afectados por la emisión de calor y por las proyecciones generadas durante el proceso de soldadura. En este apartado se describen brevemente las medidas a tener en cuenta para la protección del equipo.

Los procesos de soldadura por arco emiten calor y, también, emiten humos a elevadas temperaturas y proyecciones que pueden causar daños, quemaduras e incluso incendios. Por tanto, todos los elementos de la máquina deben ser correctamente protegidos.

La soldadura GTAW es un proceso que prácticamente no genera proyecciones y el calor emitido, respecto a otros procesos de soldadura por arco eléctrico, es inferior y, más localizado y controlado. De todas formas, sigue siendo necesario proteger los equipos frente a posibles proyecciones o fuentes de calor.

La primera de las medidas a tomar es la de buscar una nueva localización para la pantalla y los botones de la impresora. Éstos están localizados en la parte superior de la máquina. Los humos generados durante el proceso pueden ascender hasta esta localización y provocar daños. Por tanto, se debe buscar una nueva localización para la pantalla y los botones. La mejor opción es colocarlos en uno de los laterales de la máquina. También se tiene que sustituir la parte estructural superior (localización inicial de la pantalla), que es de un material plástico, por otra de algún material metálico como, por ejemplo, aluminio o acero. De este modo, esta parte estructural es capaz de soportar temperaturas elevadas y, además, aporta un plus de rigidez a la estructura.

La mayoría de las piezas estructurales de la máquina están realizadas en material polimérico (acrílico). Estas piezas no están en contacto directo con el metal base durante la soldadura, pero sí que pueden recibir pequeñas proyecciones generadas durante el proceso. Con el fin de proteger dichas piezas, éstas se van a recubrir de cinta kapton o cinta de aluminio realizando un efecto de “manta térmica”. La cinta de aluminio es de fácil obtención, presenta buena resistencia a la radiación y una alta resistencia a temperaturas elevadas, pero la alta reflectividad que presenta puede suponer un problema para el operario que se verá expuesto a la reflexión de la luz de la soldadura y, por tanto, se verá expuesto a radiación indirecta. La radiación indirecta puede ocasionar quemaduras oculares y en la piel. Por tanto, la cinta de aluminio es una buena opción para la protección térmica de los elementos, pero, de ser utilizada, se recomienda pintarla de color negro o cubrirla para mitigar la alta reflectividad. Aunque la cinta de aluminio es un método sencillo y asequible, es recomendable o preferible la utilización de cinta kapton. La cinta kapton (poliimida) es capaz de soportar temperaturas de entorno a los 300 °C y, también,



es retardante de llama. Además, presenta buenas propiedades dieléctricas por lo que puede utilizarse, también, para proteger las partes electrónicas y eléctricas de la máquina.

Para la protección del cableado, éste puede envolverse en cinta kapton, pero existen otras opciones disponibles más adecuadas. Las fundas de protección térmica de fibra de vidrio trenzada pueden soportar temperaturas de 500 °C o incluso más y, además, no rigidizan el cableado en exceso. También existe la opción de utilizar cadenas portacables con protección frente a proyecciones de soldadura. Por las características del equipo, se considera mejor opción la utilización de fundas térmicas de fibra de vidrio trenzada por el menor coste de éstas y por la mayor facilidad de adaptación al equipamiento existente.

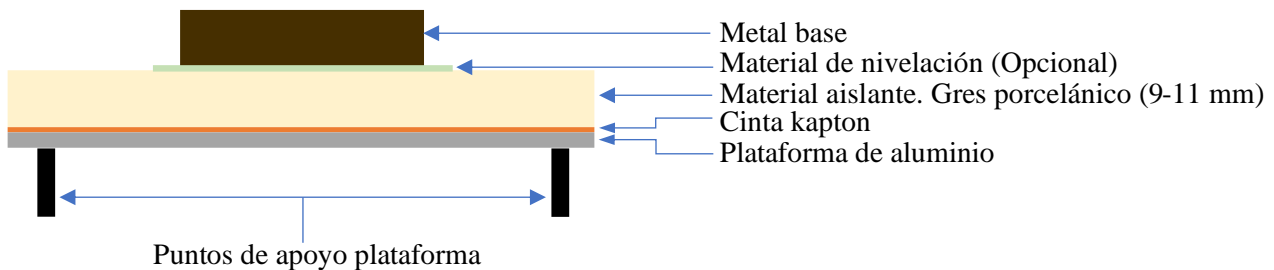
La plataforma de impresión es una de las partes que más atención requiere en cuanto a protección térmica se refiere. Al soldar se genera una gran cantidad de calor que se transfiere al metal base y, también, se transmite al resto de la máquina. En esta zona, la transferencia de calor se produce mayormente por conducción térmica, por lo tanto, según la ley de Fourier, con el uso de materiales de baja conductividad térmica se puede reducir drásticamente el flujo de calor que se transfiere por conducción.

En cierta forma, la plataforma está levemente aislada térmicamente de la máquina, ya que está elevada y sujeta por cuatro puntos. De todas formas, con el calor de la soldadura pueden producirse deformaciones en la plataforma de aluminio si se coloca el metal base directamente apoyado en ella. Es más, si colocamos el metal base en contacto directo con la plataforma, la totalidad de la máquina estaría conectada eléctricamente con el proceso de soldadura. Esto puede generar interferencias e incluso provocar daños en la electrónica de la máquina. Por tanto, la plataforma de la máquina se debe aislar térmica y eléctricamente del metal base. Para conseguir dicho aislamiento, se colocará una pieza de cerámica, más concretamente, de gres porcelánico, entre la plataforma y el metal base. En el estudio [38], se han analizado las propiedades térmicas y acústicas de cuatro baldosas de gres porcelánico comerciales. En dicho estudio, el valor medio de la conductividad térmica de las muestras de gres porcelánico medido, según los procedimientos establecidos en la norma ASTM E1530 [39], es de  $\lambda=1,3\text{W/mK}$ . Comparando dicho valor con el del aluminio (buen conductor térmico)  $\lambda=209,3\text{W/mK}$  y el del aire (buen aislante térmico)  $\lambda=0,024\text{W/mK}$  [40] se observa que el gres porcelánico presenta valores de buen aislante térmico y, por lo tanto, es un material apto para el fin deseado.

La plataforma de la máquina sólo se desplaza en un eje, este hecho facilita la adaptación del gres porcelánico. Por tanto, la base de impresión estará formada por: la plataforma de aluminio, una capa de cinta kapton, una capa de gres porcelánico y sobre este último se colocará el material base; en la siguiente *Figura 51* se muestra un esquema de dicha composición. El gres porcelánico comercial suele presentar espesores de entre 9 y 11 mm. Teniendo en cuenta la composición de la plataforma y el metal base, se perderán aproximadamente 20 mm de impresión en el eje Z. Las baldosas de gres porcelánico pueden presentar grandes tolerancias de planitud que pueden afectar en la calibración de la máquina. Es por esto por lo que, entre la baldosa y el material base se puede añadir, en caso de ser necesario, material espaciador de nivelación. La baldosa se prolongará más allá de la plataforma de aluminio para proporcionar mayor protección térmica al cableado y a la estructura de la máquina. También, se colocarán baldosas de gres porcelánico en

los laterales del volumen de impresión para proteger frente a posibles proyecciones el resto de la máquina. Siempre se debe procurar realizar los cortes adecuados a las baldosas para no interferir en los movimientos de la máquina ni reducir el volumen de impresión.

Con las protecciones anteriormente descritas se estima que la máquina obtendrá las correctas protecciones térmicas y eléctricas para su funcionamiento. Si se quisiera aumentar la seguridad operativa de la máquina, existe la opción de realizar una cabina para introducir la máquina en su interior.



*Figura 51: Esquema de la composición de la plataforma de la máquina.*

Dicha cabina puede incluir un sistema para generar una atmósfera inerte en todo el volumen de trabajo e incluir, también, un sistema de extracción de humos en su parte superior. Realizar esta cabina de atmósfera inerte supondría mejorar la calidad de los cordones de soldadura obtenidos y aumentar la seguridad del operario. La cabina sería capaz de mitigar los efectos de la radiación producida durante el proceso de soldadura y, también, evitaría el riesgo de quemaduras por proyecciones hacia el operario. Por tanto, el operario podría manejar el equipo con EPIs de menor protección y mayor comodidad. De todas formas, esta cabina se presenta como un agregado opcional y no se estima necesaria. Además, el consumo de gas protector para generar la atmósfera inerte en la totalidad de la cabina sería excesivo y escaparía del presupuesto de este estudio. Se estima, por tanto, que realizar una cabina adaptada es una buena opción para mejorar la calidad de las piezas y la seguridad operativa, pero se trata de un elemento opcional y, por tanto, prescindible.

## 5. PROGRAMACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS

A lo largo de este capítulo, se describe la metodología operativa de la máquina. Esto incluye: describir la electrónica y su firmware, cómo operar con la máquina, el software de laminación, la calibración de los distintos parámetros de la máquina, las adaptaciones necesarias y la realización de unos planes experimentales en los que: se definen las trayectorias, se obtiene el G-code y se presenta cómo evaluar los resultados obtenidos. A lo largo de los planes de experimentación, se muestran los conceptos necesarios y se indica la finalidad de cada uno de ellos. Cabe destacar que, ante la situación actual causada por el virus COVID-19 y el confinamiento de la población, las distintas pruebas no se han podido llevar a cabo, sin embargo, se han elaborado los nombrados planes de experimentación con el fin de registrar y manifestar los distintos procedimientos.

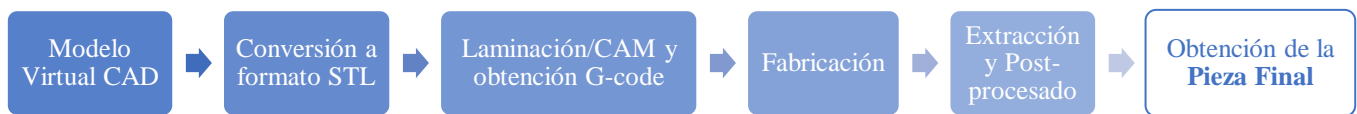
### 5.1. Metodología

En este apartado se definen, de forma genérica, los pasos necesarios a realizar para la obtención de los movimientos de la máquina y la producción de piezas mediante FA. Generalmente, en fabricación aditiva se parte de un modelo 3D que, posteriormente, es segmentado capa a capa para su posterior fabricación. Dicho esto, los pasos más comunes a seguir se esquematizan en la siguiente *Figura 52* y son los siguientes (en base a Domingo E., M., 2016. Pág. 30-31, [41]):

1. Modelo virtual CAD: Para la fabricación aditiva, generalmente, se parte de un modelo 3D en formato CAD que describe al completo la geometría de la pieza a realizar. Normalmente, cualquier software de CAD será apto para dicho fin. En este estudio, el software de CAD utilizado ha sido Solidworks® de Dassault Systemes.
2. Conversión a formato *Stereolithography* (STL): Este tipo de fichero se ha convertido en un estándar en la industria de fabricación aditiva. Anteriormente, en el apartado “2.3. Evolución de la fabricación aditiva” ya se presentó este tipo de formato de archivo. De forma resumida, es un tipo de fichero que describe la superficie externa del fichero CAD original y, por tanto, la geometría del modelo. Es un formato de archivo que, al ser más universal y contener menor información, permite la fácil exportación de modelos entre distinto software. Meshmixter es un software gratuito que permite detectar y reparar errores en archivos STL.
3. Laminación/CAM y obtención del G-code: En este punto se busca la adecuación del modelo 3D al tipo de tecnología de FA y de máquina a utilizar. Este paso, normalmente, es el que requiere mayor esfuerzo y trabajo. Consiste en realizar las adaptaciones necesarias del archivo STL para la correcta fabricación de la pieza. Se manipula la orientación, los parámetros de trabajo y se realiza el segmentado, laminación o, también nombrado en inglés, *slicing* o “corte”. La geometría se corta en secciones transversales, llamadas capas, que se superponen una encima de la otra formando la pieza tridimensional. En base a estas capas, se obtiene el G-code o código G. Generalmente, en este paso se utiliza software adaptado al tipo de máquina a utilizar. Más adelante se muestra como se ha abordado este paso en el caso concreto de este estudio.

4. Fabricación: En este paso se lleva a cabo la fabricación de la pieza. Simplemente se debe transferir el código G generado al equipo y empezar el proceso de producción.
5. Extracción y Post-procesado: Una vez la máquina deja de trabajar, se deben realizar un conjunto de pasos para la obtención de la pieza producto final. Existe la creencia de que la FA genera piezas finales y esto no es cierto. Sí que es cierto, que los procesos productivos pueden simplificarse, pero en la mayoría de las ocasiones, para la obtención de piezas finales funcionales, se deben realizar tratamientos manuales posteriores como son la separación de la pieza del soporte, la eliminación de soportes o tirantes, el perfeccionamiento del acabado superficial, el repaso de taladros y tolerancias, etcétera.
6. Obtención de la pieza final: Tras la realización de todos estos pasos, se obtiene la pieza producto final totalmente funcional y lista para ser usada.

A continuación, se muestran los pasos de forma esquemática en la siguiente *Figura 52*.



*Figura 52: Esquema del proceso de fabricación aditiva.*

Cabe destacar que este procedimiento o metodología no siempre es así. En el caso concreto de este estudio, la falta de software especializado en la tecnología de FA utilizada; ha provocado que algunos de los pasos deban hacerse de forma manual manipulando directamente el código G. En ocasiones, no se ha partido del modelo CAD y la obtención del código G ha sido, en su mayoría, manual, ya que es necesario modificar el código G para ajustarlo al proceso de soldadura GTAW y, en determinadas trayectorias sencillas, es mejor realizar el código o, parte de él, manualmente. Más adelante, se detallan estas modificaciones. Actualmente, existe software especializado en el cual se integran en distintos módulos algunos de los pasos anteriormente descritos. Es decir, el propio software de diseño CAD puede incluir un módulo de CAM y así obtener directamente el código G; unificando y simplificando el proceso. Aunque en los siguientes apartados, se describe en detalle la sistemática y el software utilizado en este estudio, se avanza que se ha realizado el CAD con el software Solidworks® de Dassault Systemes y la laminación se ha realizado, mayormente, con Ultimaker Cura 4.5 y Inkscape, siendo necesaria la posterior modificación manual del código G.

## 5.2. Electrónica, *firmware* y programas de laminación

En este apartado se describe el tipo de electrónica, *firmware* y *software* utilizado. Estos tres elementos tienen una estrecha relación, debido a que, deben ser capaces de comunicarse entre sí y hacerlo de la forma correcta. Es por esto por lo que se presentan de forma conjunta, ya que la elección de uno puede influir en el siguiente. Estos tres elementos deben ir en consonancia y ser compatibles entre sí.

Para la elección de la electrónica debemos tener en cuenta el número de motores paso a paso a mover. En este caso, son 5 motores: 1 motor para el eje X, 1 motor para el eje Y, 2 motores clonados para el eje Z y 1 motor para el alimentador del material de aporte. Existe un gran surtido de electrónica capaz de trabajar con este tipo de configuración, ya que es una configuración típica de impresora 3D FDM. En el caso que nos ocupa, el motor del extrusor va a ser sustituido y va a realizar la función de motor del alimentador del hilo, por tanto, la adaptabilidad es total.

La impresora con la que se está realizando el estudio contiene una electrónica propia que incluye un *firmware* propio adaptado basado en Marlin. La placa base se muestra en la siguiente *Figura 53*. Tiene integrados los drivers del tipo A4988. La electrónica se probó y cumplía las especificaciones necesarias para la realización de este estudio, por tanto, se adelanta que la configuración de fábrica es la que se va a utilizar.

Por supuesto, existen otras opciones en el mercado. Las placas se pueden dividir en las de 8-bits y las de 32-bits. Las más comunes son las de 8-bits por su menor coste, aunque las de 32-bits pueden ofrecer ciertas ventajas en cuanto a potencia de cálculo, velocidad y eficiencia. La diferencia de precios entre unas y otras no suele ser un factor decisivo, aunque las de 32-bits tienen un mayor coste. Por el lado de las placas 8-bits, se considera una buena elección la combinación de la placa Arduino Mega junto con una *shield* Ramps 1.4. Esta placa permite controlar 5 motores y suele trabajar a 12 V. Por lo que respecta a las placas de 32-bits, como buenas opciones tenemos la Duet Wifi que permite controlar 6 motores e incluso permite la expansión para el control de más motores y la MKS Gen que permite controlar hasta 5 motores. Por supuesto, existen muchas más placas electrónicas en el mercado, pero las presentadas son las más comunes y se consideran las más aptas para la maquinaria que deseamos gestionar y el presupuesto del estudio.

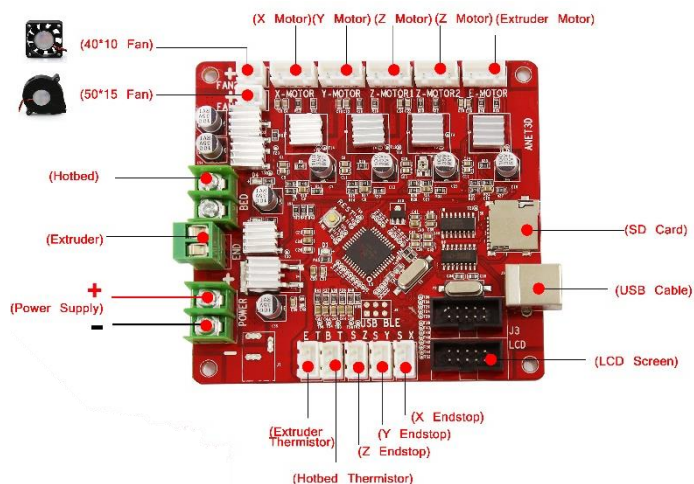


Figura 53: Placa electrónica Anet A8. Fuente: Manuales facilitados con la impresora.



El *firmware* es un programa o *software* que establece la lógica de más bajo nivel y que proporciona el control de un *hardware* específico. En otras palabras, aunque el *firmware* es un *software* de bajo nivel, se puede decir que, el *firmware* es el puente entre el *hardware* y el *software*. Es decir, el *firmware* es el encargado de traducir las instrucciones dadas mediante el *software* en impulsos eléctricos que “entiendan” los componentes electrónicos del *hardware*. En definitiva, el *firmware* es el *software* que tiene comunicación inmediata con el *hardware*. Esta definición puede ser algo basta, pero sirve para entender, por lo menos conceptualmente, qué es el *firmware*. Dentro de los *firmwares* más comunes destinados a máquinas de impresión 3D y CNC encontramos: marlin, grbl, skynet3d, sprinter, repetier-firmware, reprop firmware, smoothieware, teacup, klipper y redeem. Cada uno de ellos tiene sus peculiaridades y singularidades que, dependiendo del uso final, pueden ser interesantes. La mayoría de ellos están enfocados en impresión 3D, aunque algunos son más aptos para CNC y láser. Un aspecto muy importante en la elección del firmware es la compatibilidad con la placa electrónica. Por ejemplo, Marlin sólo es compatible con placas de 8-bits.

Marlin es un firmware de código abierto y con una gran comunidad *maker* que lo apoya y que trabaja en mejorarlo continuamente. Es el descendiente de los *firmwares* grbl y sprinter. Está en continuo desarrollo y es, actualmente, uno de los *firmwares* más utilizados en el mundo de la impresión 3D. Es apto para un gran número de placas controladoras y funciona perfectamente en impresoras cartesianas. Existe la limitación de que no está adaptado para placas de 32-bits. Ofrece un gran abanico de características y posibilidades. Existe un sinfín de documentación a cerca de él, por tanto, se facilita su configuración convirtiéndolo en un *firmware* todoterreno. Es, posiblemente, la mejor elección para implementarlo en la maquinaria de este estudio.

Por lo que respecta al *software* o programa de laminación, la única consideración a tener en cuenta es que éste sea capaz de generar archivos G-code o códigos G compatibles con el *firmware* elegido. Existen varios programas que son capaces de generar las trayectorias de la máquina, algunos de ellos son: Ultimaker Cura, Inkscape, Slic3r, Simplify3d y Repetier Host, entre otros. En algunas ocasiones, el *software* de comunicación con la máquina está incluido en el programa de laminación, en otras, será necesario utilizar un programa específico para la comunicación con la máquina como, por ejemplo, el programa: Universal Gcode Sender.

Entonces, se plantean varias opciones. La primera sería utilizar la electrónica por defecto con el firmware por defecto y un programa de laminación adecuado (Cura). La segunda opción sería la de utilizar Arduino Mega + Shield Ramps 1.4 con firmware Marlin y un programa de laminación adecuado (Cura). La tercera opción sería utilizar Arduino Mega + Shield Ramps 1.4 con firmware grbl, generar trayectorias mediante el programa Inkscape y utilizar como programa de comunicación el Universal Gcode Sender.

A lo largo de este apartado, se ha expresado la gran cantidad de opciones existentes en lo que respecta a la electrónica, el *firmware* y el *software*. Finalmente, como ya se dejó entrever anteriormente, la placa electrónica elegida es la que se muestra en la *Figura 53* y que es propia de la máquina Anet A8. Por tanto, se ha escogido la primera opción presentada. Esta opción es perfectamente válida y permite reducir el presupuesto del estudio al aprovechar la placa existente. También, se trabajará con el *firmware*



preinstalado en dicha placa. Se trata de un *firmware* propio que está basado en Marlin. De todas formas, si se desea realizar un cambio de firmware existen formas de *flashear* la placa electrónica para insertarle Marlin desde cero o, también, se puede recurrir a la segunda opción anteriormente descrita. Y, por último, los programas con los que se van a generar las trayectorias van a ser el Ultimaker Cura 4.5 y el Inkscape.

Debido a la naturaleza de la tecnología a implementar, es necesario modificar el G-code o código G manualmente. En trayectorias simples, se podrá prescindir de programas de laminación y recurrir a la codificación manual. En trayectorias más complejas, si se dispone de un modelo 3D, se opta por la utilización del programa Ultimaker Cura 4.5. En ocasiones, se recurre al programa Inkscape para comparar códigos y prescindir del modelo 3D, ya que Inkscape es un programa que permite generar directamente código G desde imágenes vectorizadas.

### 5.3. Modificaciones del código G y calibración

#### 5.3.1 Código G y comandos básicos

El G-code, código G o, también, conocido como RS-274, es un lenguaje de programación habitual y muy común para el control de máquinas de control numérico (CNC). Se estandarizó en los años 80 bajo la norma ISO 6983 [42]. El código G se almacena en formato texto de forma que puede consultarse, leerse y editarse con un editor de texto. Generar código G mediante programas de modelado, CAM o de laminación es lo más común, pero, también, puede codificarse a mano si los movimientos y trayectorias son simples. El código G, básicamente, almacena las instrucciones y los movimientos que debe realizar la máquina para la realización de una determinada tarea [43].

El código G, por tanto, debe adecuarse al tipo de máquina y tecnología a utilizar y, al mismo tiempo, la máquina debe ser capaz de interpretar dicho código. Como ya se ha venido anunciando anteriormente, las trayectorias y el código G de este estudio se generan, en su mayoría, con el programa de laminación Ultimaker Cura 4.5. Los distintos códigos G obtenidos mediante el programa de laminación están diseñados para usarse en impresoras 3D de FDM, por tanto, el código G se tiene que modificar manualmente para adaptarlo al proceso de fabricación requerido en este estudio.

Todas las líneas de código G empiezan por un comando. Si se quieren añadir comentarios al código, se realiza mediante el signo de punto y coma (;) delante del texto. Los distintos comandos del código G se pueden clasificar en comandos-G, comandos-M y otros comandos. A continuación, se presentan algunos de los comandos más habituales en código G y, posteriormente, se muestran las modificaciones que se tienen que realizar en los códigos obtenidos para la adaptación a la tecnología de FA aplicada en este estudio (soldadura GTAW).

Los principales comandos-G que podemos encontrar en el código generado son:

**G0:** Posicionamiento rápido.

**G1:** Movimiento rectilíneo.

**G2 y G3:** Movimiento en arco controlado (G2 en sentido horario y G3 en sentido antihorario).

**G4:** Espera o Pausa. Se pausa la actividad de la máquina durante el tiempo marcado. La máquina mantiene y controla las temperaturas y otras configuraciones durante esta pausa. Seguido de S se configura en segundos y seguido de P se configura en milisegundos. Por ejemplo, si indicamos G4 S10 o G4 P10000, la máquina esperará 10 segundos antes de realizar cualquier otra acción.

**G10:** Retracción del hilo.

**G11:** No retractar el hilo.

**G17, G18 y G19:** Seleccionar planos de movimiento. G17 (XY), G18 (ZX) y G19 (YZ).

**G21:** Programación en milímetros.

**G28:** Mover al origen o cero 0 (*Homing*). Si no se indican ejes, se mueven todos los ejes a la posición cero. Puede utilizarse para determinados ejes, por ejemplo, la línea G28 X0 Y0 mueve los ejes X e Y al cero, pero el eje Z permanece inalterable.

**G90:** Posicionamiento absoluto. Tras este comando las coordenadas son absolutas en relación con el origen de la máquina.

**G91:** Posicionamiento relativo.

**G92:** Registro de la posición actual como si de otra nueva se tratara. Establece la posición del cero absoluto donde se indique. No produce movimiento físico.

**G94:** Establecer velocidad de avance en las unidades indicadas (mm, in, grados) por minuto.

Los principales comandos-M que podemos encontrar en el código generado son:

**M82:** Establecer los valores del extrusor como absolutos.

**M84:** Apagar los motores o detener la espera inactiva (por ejemplo, al terminar la impresión).

**M92:** Establecer pasos por milímetros de los ejes.

**M104:** Establecer la temperatura del extrusor. Generalmente, va acompañado del valor de temperatura a establecer. Se utiliza de la siguiente forma: M104 S220 (que significa: establecer la temperatura del extrusor en 220 °C). Esta forma de fijar los valores se utiliza en distintos comandos.

**M105:** Obtener temperatura del extrusor. Se utiliza para enviar y leer la información de los sensores de temperatura desde otro dispositivo. Por ejemplo, para controlar la temperatura desde el ordenador o la pantalla de la máquina.

**M106:** Encender ventilador.

**M107:** Apagar ventilador.

**M109:** Establecer la temperatura del extrusor y esperar. Comando parecido al M104, pero en este caso se espera a alcanzar el valor de temperatura fijado antes de continuar con la siguiente operación. Se utiliza, sobre todo, en el inicio de la impresión con el fin de obtener la temperatura idónea.

**M140:** Establecer la temperatura de la cama caliente (rápido).

**M190:** Esperar a que la temperatura de la cama caliente alcance la temperatura marcada.

**M201:** Establecer la aceleración máxima.

**M204:** Establecer aceleración predeterminada.

**M501:** Leer parámetros de la EEPROM.

Existe un gran número de comandos más; todos ellos pueden consultarse en la referencia [44]. Los presentados, anteriormente, son algunos de los más utilizados en código G de

impresión 3D FDM y, también, son los que más se van a utilizar en este estudio para realizar las distintas trayectorias.

Los comandos pueden ir acompañados de otras órdenes. Por ejemplo, cuando se requiere realizar una operación a una determinada velocidad se indica mediante la letra **F** seguida del valor deseado. Las unidades de velocidad se indican en milímetros o pulgadas por minuto dependiendo de las unidades seleccionadas (G21, unidades en milímetros). En este estudio se trabaja mayormente en sistema métrico e internacional, por tanto, se seleccionará la opción de trabajar en escala de milímetros. Por ejemplo, el comando G1 F6000 X30 Y70 moverá en línea recta los ejes X e Y hasta las coordenadas indicadas a una velocidad de 6000 mm/min o, lo que es equivalente, 100 mm/s.

Otros comandos requieren ir acompañados del valor del parámetro requerido. Estos comandos se acompañan de la letra **S** seguida del valor correspondiente. Se ha mostrado en la presentación del comando M104 su utilización.

### 5.3.2 Modificaciones del código G

Los códigos G generados por el laminador utilizado (Cura) están destinados a máquinas que utilizan la tecnología de fabricación aditiva por extrusión de material tipo FDM, por tanto, se deben realizar cambios en el código G para adaptarlo al proceso de FA basado en soldadura GTAW.

Las modificaciones en el código G giran en torno a 4 aspectos clave. Estos son:

- La eliminación de comandos destinados a tecnologías FDM.
- Programación del procedimiento requerido para la iniciación del arco eléctrico. (*Lift-Arc*).
- Cálculo de la cantidad y velocidad del material de aportación para definir los movimientos del motor del alimentador de hilo.
- Establecer los correctos parámetros de trabajo.

A continuación, se detallan las modificaciones para solventar cada uno de estos puntos. En el anexo “B1. Código obtenido directamente del laminador” se muestra un ejemplo del código obtenido directamente del laminador sin modificaciones y, posteriormente, en el anexo “B2. Código adaptado. Prueba estimación parámetros” se muestra dicho código modificado con el fin de poder apreciar los cambios realizados. En dicho anexo, se muestra de forma más detallada y con indicaciones de color y comentarios los cambios a realizar sobre el código G. Se recomienda consultar dichos anexos para una mejor comprensión de dichas modificaciones. En lo que queda de apartado, se comenta cómo se han solucionado los 4 puntos clave anteriormente expuestos.

Respecto al primer punto, el código G generado por el laminador contiene comandos destinados a tecnologías de FA FDM que de no ser modificados impiden la ejecución de los movimientos de los motores. Cabe mencionar que los componentes: extrusor, cama caliente y sensores de temperatura se eliminan del *hardware*. Por tanto, todos aquellos comandos que estén relacionados con la lectura o fijación de temperaturas van a ser eliminados. De no hacerlo, pueden ocasionar comportamientos extraños e indeseados. Por

ejemplo, códigos como el M109 y el M190 bloquean los movimientos de la máquina hasta alcanzar las temperaturas indicadas del extrusor y la cama caliente; esta temperatura nunca se va a alcanzar porque no existen dichos elementos en el *hardware*, por tanto, si no se eliminan dichos comandos, la máquina nunca iniciará el proceso de fabricación. En resumen, todos aquellos comandos relacionados con el extrusor, la cama caliente y los sensores de temperatura deben eliminarse. Algunos de estos comandos son, por ejemplo, M104, M105, M106, M107, M109, M140 y M190, entre otros. En el anexo “B1. Código obtenido directamente del laminador” se muestra mediante un código ejemplo los comandos a eliminar marcados en azul.

Respecto al segundo punto, la iniciación y estabilización del arco eléctrico es fundamental en el proceso de soldadura GTAW. Si el arco es inestable o no se genera correctamente, el material de aportación no va a fundir correctamente y, por tanto, no se van a obtener buenos resultados. Un error en este procedimiento generará graves consecuencias en el proceso de fabricación. El procedimiento para iniciar el arco depende del equipo de soldadura a utilizar, en este caso, tal y como se describió, anteriormente, en el apartado “4.2.1. Equipo de soldadura”, el procedimiento es *Lift-Arc*. Y, por tanto, la secuencia de movimientos de la máquina es la siguiente: la antorcha debe descender hasta que el electrodo tome contacto con la base, debe permanecer en contacto con el metal base por un período de tiempo de 2 segundos para estabilizar el arco y, posteriormente, el electrodo debe ascender una determinada distancia (se recomienda que sea de 3 veces el diámetro del electrodo, por tanto, para electrodos de 1,6 mm de diámetro será de 4,8 mm y para electrodos de 2,4 mm de diámetro será de 7,2 mm). Esta secuencia se tiene que añadir cada vez que se tenga que iniciar el arco, ya sea al inicio de la impresión o al inicio de cada una de las capas. Al terminar, para cortar el arco eléctrico, basta con levantar rápidamente el electrodo.

A continuación, se muestra, en un fragmento de código G, la secuencia de movimientos a realizar para iniciar el arco (suponiendo que el metal base se encuentra en contacto con el electrodo a una altura de Z0). En el anexo “B2. Código adaptado. Prueba estimación parámetros” se puede observar un código al completo y, también, dicha secuencia marcada en verde.

```
G0 F6000 X62 Y62 Z30      ;Pre-posicionar la antorcha en el
                             ;punto de inicio.

G4 S4                      ;Esperar 4 segundos antes de iniciar
                             ;el arco por razones de seguridad.

G0 F300 X62 Y62 Z0        ;Bajar la antorcha hasta tocar el metal
                             ;base para iniciar el arco. Esto debe
                             ;hacerse a velocidades muy bajas para
                             ;minimizar la contaminación del
                             ;electrodo.

G4 S2                      ;Mantener el electrodo dos segundos
                             ;en contacto con el metal base para
                             ;iniciar el arco y estabilizarlo.
```

```
G0 F300 X62 Y62 Z4.8      ;Subir la antorcha para terminar de
                             ;establecer el arco. La distancia de
                             ;arco recomendada es de 3 veces el
                             ;diámetro del electrodo. Para
                             ;electrodos de diámetro 1.6 mm => Z4.8
                             ;y para electrodos de diámetro
                             ;2.4 mm => Z7.2
```

Una vez terminado el cordón, para finalizar el arco bastaría con levantar rápidamente el electrodo con un comando como:

```
G0 F6000 X62 Y62 Z30      ;Levantar la antorcha rápidamente para
                             ;cortar el arco eléctrico.
```

Es importante detectar los puntos donde se requiere iniciar y finalizar el arco para establecer estas secuencias.

Respecto al tercer punto, el cálculo de la cantidad y velocidad del material de aportación es esencial para la generación de cordones homogéneos y de calidad. El programa de laminación no permite controlar la velocidad del motor del extrusor de forma directa; el programa calcula la velocidad a través de otros parámetros como la boquilla del extrusor y el diámetro de filamento. Esta forma de calcular la velocidad del hilo puede ser una forma sencilla en impresión FDM, pero es de difícil aplicación en lo que a este estudio se refiere, ya que se desconoce los cálculos que internamente realiza el programa de laminación. Se ha observado que, si aplicamos una sobre-extrusión o un porcentaje más alto en el flujo de material en el programa laminador, el código G varía, únicamente, en las coordenadas del extrusor. Es decir, la velocidad del motor alimentador del hilo se expresa en el código G a través de la longitud de material aportado durante la trayectoria. Se expresa mediante coordenadas y en milímetros. En la siguiente línea de código se muestra un ejemplo, corresponde a la coordenada E resaltada en negrita.

```
G1 X158 Y158 E143.68378
```

Entonces, si se desea obtener una determinada velocidad de hilo del material de aportación, se debe calcular la longitud de hilo a aportar en función de la trayectoria a realizar. Para el cálculo utilizaremos la siguiente ecuación de la velocidad en mecánica clásica:

$$v = \frac{dx}{dt}$$

Supongamos que se va a realizar un cordón de 100 mm de longitud y que la velocidad de avance de la máquina es de 5 mm/s ( $\equiv$  300 mm/min). Por tanto, según la ecuación de velocidad, el trayecto se va a realizar en un tiempo total de 20 segundos. Si la velocidad del material de aportación requerida es de 1,8 m/min ( $\equiv$  30 mm/s), se requerirá en esos mismos 20 segundos una longitud de hilo de 600 mm. Esos 600 mm son los que se introducen en el código G.

Por tanto, en el código G se expresa de la siguiente forma:

G92 E0	;Establecer valores motor hilo como absolutos.
G1 F300 X0 Y0 E0	;Posición inicial del cordón.
G1 F300 X100 Y0 E600	;Posición final del cordón y longitud de
	;material de aportación aplicado durante la
	;trayectoria.

Este método exige calcular y coordinar la distancia recorrida por la antorcha a una determinada velocidad con la velocidad de aportación del hilo. El cálculo debe realizarse para cada una de las trayectorias realizadas por la máquina. Como el laminador no permite su ajuste, deben realizarse los cálculos y modificaciones de forma manual. Esto en trayectorias sencillas (líneas rectas o curvas sencillas) puede realizarse perfectamente, pero en trayectorias complejas, los cálculos se complican y realizar la modificación del código resulta tediosa y puede ser una fuente de errores. Entonces, para experimentaciones sencillas, como las que se realizan en este estudio, es un método perfectamente válido, pero hay que aclarar que, productivamente hablando, es muy ineficiente. La solución a este problema reside en integrar dicho cálculo en el programa laminador para que se realice de forma automática, por tanto, sería recomendable realizar algún programa o adaptación que respondiera mejor a la tecnología de fabricación aditiva utilizada. Por otra parte, el hecho de calcular la longitud de hilo a utilizar permite, si se conoce el diámetro del hilo, el cálculo del volumen total de material depositado y, consecuentemente, permite determinar, mediante la densidad del material, el peso total de la pieza a producir y el coste de ésta.

Respecto al cuarto punto, establecer los correctos parámetros de la máquina no es sencillo. Son muchos los parámetros que tienen efecto directo sobre la calidad del cordón de soldadura, algunos de estos parámetros son: la intensidad de soldadura, el caudal del gas de protección, el avance o velocidad de la antorcha, la velocidad del hilo de soldadura, el espesor del metal base, la limpieza de los metales, el tipo de electrodo, etcétera.

Para establecer los correctos parámetros existen valores de referencia. Algunos de ellos ya se han descrito con anterioridad a lo largo del capítulo “4. Diseño y configuración de la maquinaria”. El ajuste de los parámetros de soldadura puede consultarse en numerosos libros y artículos de soldadura, pero, de todas formas, será necesario probar en cada caso qué valores funcionan adecuadamente. Es por esto por lo que, una de las primeras experimentaciones planteadas, gira entorno a la estimación de los óptimos parámetros de la máquina para la obtención de cordones de calidad. Este cuarto punto se expone en mayor profundidad en el siguiente apartado “5.4. Prueba estimación parámetros equipo”

### 5.3.3 Calibraciones de la máquina

Las distintas adaptaciones realizadas a la máquina de impresión 3D generan la necesidad de calibrar la máquina para obtener resultados acordes a las instrucciones dadas. Principalmente, estas calibraciones se basan en 2 puntos:

- Recolocación de los finales de carrera y nivelación de la plataforma.
- Medición y ajuste de las verdaderas distancias recorridas por los motores.



Respecto al punto primer punto, la adición de la antorcha al soporte y la adición de material de aislamiento y metal base a la plataforma reducen las dimensiones del volumen de trabajo y, por tanto, deben modificarse los finales de carrera. Este punto se realiza de la misma forma que lo descrito con anterioridad en el apartado “4.1.2. Calibración y pruebas de impresión” la principal diferencia es que, para la correcta calibración, la punta del tungsteno tiene que estar en contacto con el metal base en el límite marcado por el final de carrera ( $Z = 0$ ). El final de carrera del eje Z se deberá subir aproximadamente 20 mm debido al material de aislamiento adicional y al metal base. El final de carrera del eje X se deberá mover 47 mm debido al espacio ocupado por la antorcha. Estos cambios son necesarios debido a las nuevas dimensiones del equipo instalado. Tras ajustar los finales de carrera se debe nivelar la cama para que en  $Z = 0$  el electrodo de tungsteno esté en contacto, de igual forma, con todos los puntos del metal base.

Al mover los finales de carrera se reduce el volumen máximo de trabajo, el volumen inicial era de 220 mm x 220 mm x 240 mm y el volumen de trabajo final es de 173 mm x 220 mm x 220 mm. Lo que supone una pérdida aproximada del 28% del volumen de trabajo. La máquina no está destinada a realizar piezas de gran tamaño, por tanto, esta pérdida de dimensiones en el volumen de trabajo es aceptable.

Respecto al segundo punto, los cambios realizados no deberían afectar a las verdaderas distancias recorridas por los motores de los ejes X, Y, Z, ya que no se han modificado las relaciones de transmisión de dichos ejes. Estos ejes suelen venir bien calibrados por defecto, de todos modos, se pueden verificar para asegurar la buena calibración. El motor que sí es necesario calibrar es el del alimentador de hilo. Este motor anteriormente estaba destinado a mover el filamento por el extrusor y con la nueva configuración se ha adaptado para mover el material de aportación. Obviamente, la relación de transmisión es distinta y, por tanto, hay que ajustar los pasos por milímetro del motor para que cuando se le indique mover, por ejemplo, 30 mm de hilo mueva exactamente 30 mm. Para el ajuste de los pasos por milímetro, se puede realizar el cálculo teórico de la relación de transmisión obtenida en el alimentador de hilo, sin embargo, los motores y los distintos elementos mecánicos pueden tener tolerancias que generan desviaciones del valor real. Por este motivo, se considera que la mejor forma de calibrar el movimiento de dicho motor es experimentalmente.

Para realizar la calibración del motor del material de aporte se debe utilizar un programa para leer los datos actuales configurados en la memoria EEPROM como, por ejemplo, el programa pronterface. El procedimiento es sencillo, seleccionamos el puerto y conectamos con la máquina. Enviando el comando M501 se pueden conocer los parámetros actuales de la máquina. La línea marcada bajo el código M92 es la correspondiente a los pasos por milímetro de los motores.

El procedimiento experimental es el siguiente, marcamos una determinada distancia en el hilo de soldadura, le indicamos a la máquina mediante el programa pronterface que mueva dicha cantidad de hilo y, medimos la diferencia existente entre el valor consigna y el valor obtenido. Tras esta operación, simplemente se debe realizar una regla de tres entre la distancia consigna, el valor de pasos por milímetro actual y la distancia obtenida. Con este cálculo se obtiene el valor de los pasos por milímetro que debemos configurar para obtener una buena calibración de la máquina.

El cambio de configuración del nuevo valor en la máquina se puede realizar de dos formas. Si se hace directamente desde el programa pronterface, se modifican los valores del firmware de la máquina. Para evitar modificar valores del firmware, que en ocasiones puede resultar delicado, otra opción válida es modificar el valor a través del código G del laminador con el comando M92 seguido de E(valor obtenido de la regla de tres). Es decir, hay que añadir una línea en el encabezado del código G que sea, por ejemplo, M92 E400.

## 5.4. Prueba estimación parámetros equipo

### 5.4.1 Introducción

Esta primera prueba experimental se propone con el objetivo de ajustar los parámetros de la máquina para obtener cordones de soldadura adecuados al trabajo a realizar y, con el fin de obtener parámetros de referencia futuros. Por tanto, se van a realizar distintos cordones de soldadura rectos y en una sola pasada. Estos cordones se van a realizar variando algunos de los parámetros de soldadura como: la intensidad de corriente, la velocidad de avance y la velocidad del material de aportación.

A continuación, se describe la ejecución de la prueba en el plan de experimentación y, finalmente, se realiza una explicación de como analizar los resultados obtenidos. Este análisis pretende inspeccionar correctamente los cordones para así, determinar los parámetros óptimos. Esta prueba es clave para definir, en próximas experimentaciones, los parámetros de diseño y de fabricación.

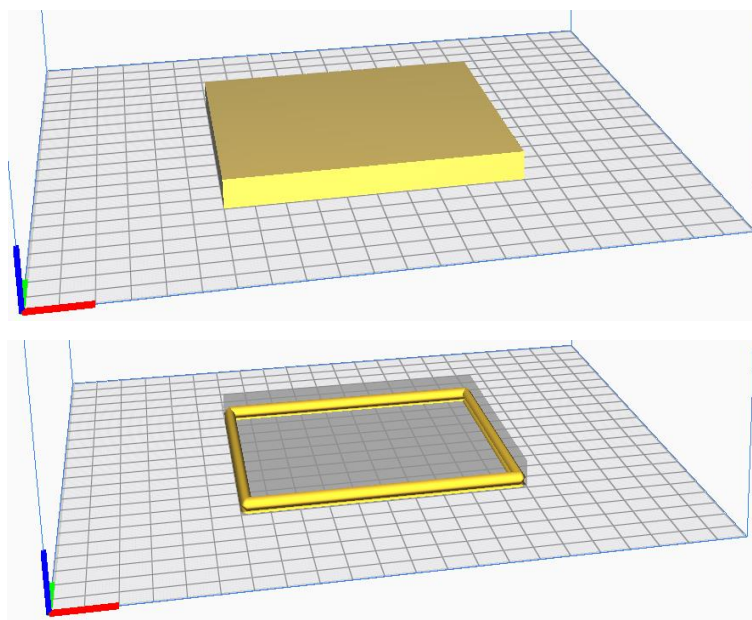
### 5.4.2 Plan de experimentación

Para la realización de esta prueba de estimación de parámetros, se va a partir de un fichero CAD que consiste en un prisma cuadrangular de dimensiones 100 x 100 x 10 mm. El CAD podría ser prescindible y programar las trayectorias directamente en código G, pero realizarlo con un fichero CAD permite ver las posibles configuraciones que ofrece el programa de laminación. Por tanto, se debe crear la geometría deseada en Solidworks®, posteriormente, se debe exportar en formato .stl y, finalmente, se debe importar en el programa laminador (Ultimaker Cura 4.5).

En el momento de programar las trayectorias es importante conocer el origen o cero para así poder orientar la pieza de forma correcta. Hay que diferenciar entre dos aspectos, éstos son: el cero de la máquina y el cero de la pieza. El cero de la máquina (*Homing*) es físico, es decir, es propio del *hardware* y viene fijado por los finales de carrera de la máquina. Por el contrario, el cero de la pieza se puede fijar donde se requiera porque se establece mediante *software*, obviamente, se escogerán puntos que faciliten la programación y la orientación de la pieza como, por ejemplo, esquinas, agujeros, aristas, etcétera.

Para la obtención de las trayectorias, el programa laminador se ha configurado en base a la configuración de la impresora Anet A8 y se ha ajustado el diámetro de boquilla a 4 mm para visualizar los cordones de forma similar al resultado final. Este diámetro de boquilla se ajustará mejor con los resultados obtenidos en esta experimentación, lo mismo pasa con los parámetros presentados a continuación. La altura de capa en esta práctica no es un factor importante, ya que sólo se realizará una capa. Se ha fijado a 5 mm para realizar el mínimo de capas posible; el mínimo posible configurable en el laminador es de 2 capas,

por tanto, se modificará el código G manualmente para realizar una sola capa. Para obtener un solo cordón de grosor de pared se indica con el parámetro: Recuento líneas de pared = 1. Los valores de grosor superior/inferior se deben poner a 0 para no generar base en la pieza. También se debe eliminar el relleno (0%) y, también, se debe deshabilitar la adherencia a la placa de impresión. En la siguiente *Figura 54* se puede observar en la parte superior, la geometría STL de partida y, en la parte inferior, las trayectorias obtenidas mediante el laminador.



*Figura 54: Superior: Geometría STL de partida. Inferior: Trayectorias generadas mediante el programa laminador.*

Con esto se está en condiciones de obtener el código G. Obviamente, al código G obtenido le deberemos realizar manualmente las modificaciones descritas con anterioridad en el apartado “5.3.2. *Modificaciones del código G*”. Éstas incluyen: adaptación del proceso de iniciación y finalización del arco (*Lift-Arc*), cálculo de la longitud de material a aportar, modificación de la velocidad de avance y del hilo, eliminación de comandos propios de tecnologías FDM y eliminación de la segunda capa, entre otras.

En el anexo “B1. *Código obtenido directamente del laminador*” se muestra el código G antes de modificar y en el anexo “B2. *Código adaptado. Prueba estimación parámetros*” se muestra el código G obtenido tras las modificaciones. Éste último es el que se va a utilizar para la realización de esta experimentación. En dicho código, será necesario modificar la altura Z y las velocidades de avance y del hilo dependiendo de la experimentación a realizar. Se realizarán distintos cordones cambiando los valores de los parámetros en el código G. A continuación, se expone más a fondo.

La elección de los distintos parámetros de soldadura tiene un impacto directo en la obtención de cordones de calidad. En los anexos “A4. *Parámetros recomendados en soldadura TIG de aceros*” y “A5. *Parámetros recomendados en soldadura MIG de aceros*” se exponen los parámetros recomendados y usuales para soldaduras de acero al carbono en procesos TIG y MIG. Aunque, se deben tomar como referencia los parámetros destinados a soldadura TIG, se incluyen, también, los parámetros de soldadura MIG, ya

que éstos pueden servir de referencia para el cálculo de la velocidad de hilo. En soldadura TIG, la tasa de deposición suele ser inferior al proceso MIG, por tanto, en soldaduras TIG las velocidades de hilo serán algo inferiores que en soldaduras MIG. Estas tablas de los anexos están enfocadas a soldaduras manuales. Como puede observarse, son muchas las variables que afectan a la soldadura y, por tanto, se deberá encontrar la configuración más idónea para el equipo empleado. El hecho de encontrar la configuración de parámetros más adecuada es el principal motivo por el que se propone esta experimentación.

A continuación, se muestra una *Tabla 12* extraída del artículo: “*Estudio comparativo de la productividad y calidad obtenidas en la soldadura de tubos de calidad T9 empleados en el sector petroquímico, mediante los procesos TIG, HW-TIG y PAW*” [45]. Esta *Tabla 12* muestra los parámetros de soldadura realizados en una soldadura TIG automatizada sobre un metal base de acero Cr-Mo: X11CrMo9-1 y con un material de aportación: ER-80-B8. La experimentación realizada en dicho estudio cumple unas características similares y extrapolables a esta experimentación, por tanto, los parámetros mostrados en la siguiente *Tabla 12* junto con los de las tablas de los anexos A4 y A5 van a servir de referencia para este ensayo.

Pasada	Intensidad [A]	Voltaje [V]	Velocidad de soldeo [mm/s]	Velocidad hilo [m/min]
<b>Raíz</b>	145	10,0	1,1	1,0
<b>Relleno</b>	175	10,1	2,0	1,7
<b>Peinado</b>	200	12,3	1,6	1,7

*Tabla 12: Parámetros utilizados en soldadura TIG automatizada de aceros. Metal base: Acero Cr-Mo X11CrMo9-1. Material de aportación: ER 80 B8. Fuente: [45].*

También se muestran en la siguiente *Tabla 13* los parámetros utilizados en tecnología WAAM (tecnología afín a la aplicada en este estudio) para aleaciones de titanio, extraídos del artículo [46]. En este caso, el metal base es Ti-6Al-4V de 11 mm de espesor y el material de aportación es hilo AMS 4954. Obviamente, estos datos son específicos para aleaciones de titanio y no son adecuados para aceros al carbono, simplemente, se muestran con carácter informativo y comparativo. Existen otros artículos similares como [51] y [52] que pueden servir de orientación en la elección de parámetros.

Intensidad [A]	Velocidad de soldeo [mm/s]	Velocidad hilo [m/min]
150	3	2

*Tabla 13: Parámetros utilizados en tecnología WAAM. Metal base: Ti-6Al-4V de 11 mm de espesor. Material de aportación: hilo AMS 4954. Fuente: [46].*

Tras valorar los distintos parámetros factibles en soldaduras de acero, basados en los anexos A4 y A5 y la *Tabla 12*, se propone realizar en esta experimentación 3 pruebas que constan de 4 cordones de soldadura de 100 mm de longitud cada uno de ellos, es decir, cada arista del cuadrado mostrado en la *Figura 54* se va a realizar con distintos parámetros de soldadura y, se van a realizar 3 cuadrados con amperajes distintos. Las pruebas se realizarán a 130 A (próximo a la máxima intensidad del equipo para el funcionamiento ininterrumpido), 110 A y 90 A. En cada una de las pruebas se variarán los parámetros de soldadura entre cordones. El cordón 1 se va a realizar a velocidad de soldadura baja y a

velocidad de hilo baja, el cordón de soldadura 2 se va a realizar a velocidad de soldadura baja y a velocidad de hilo elevada. El cordón de soldadura 3 se va a realizar a velocidad de soldadura elevada y a velocidad de hilo elevada y, por último, el cordón de soldadura 4 se va a realizar a velocidad de soldadura elevada y velocidad de hilo baja. Los parámetros de la experimentación se detallan en la siguiente *Tabla 14*.

Parámetros de Experimentación			
Prueba 1 (130 A)			
Cordón	Intensidad [A]	Velocidad de soldeo [mm/s] [mm/min]	Velocidad de hilo [m/min] [mm/min] [mm/s]
1	130	1,5 [90]	1,5 [1500] [25]
2	130	1,5 [90]	3,0 [3000] [50]
3	130	3,0 [180]	3,0 [3000] [50]
4	130	3,0 [180]	1,5 [1500] [25]
Prueba 2 (110 A)			
Cordón	Intensidad [A]	Velocidad de soldeo [mm/s] [mm/min]	Velocidad de hilo [m/min] [mm/min] [mm/s]
1	110	1,3 [78]	1,0 [1000] [17]
2	110	1,3 [78]	2,5 [2500] [42]
3	110	2,6 [156]	2,5 [2500] [42]
4	110	2,6 [156]	1,0 [1000] [17]
Prueba 3 (90 A)			
Cordón	Intensidad [A]	Velocidad de soldeo [mm/s] [mm/min]	Velocidad de hilo [m/min] [mm/min] [mm/s]
1	90	1,0 [60]	0,8 [800] [13]
2	90	1,0 [60]	2,2 [2200] [37]
3	90	2,0 [120]	2,2 [2200] [37]
4	90	2,0 [120]	0,8 [800] [13]

Tabla 14: Parámetros de experimentación. Definición de las pruebas experimentales.

Los tiempos invertidos y la longitud de hilo de material de aportación para cada una de las experimentaciones se muestran en la siguiente *Tabla 15* (teniendo en cuenta una distancia recorrida por la antorcha de 96 mm por cordón).

Tiempo y consumo de material				
Prueba 1 (130 A)				
Cordón	Tiempo [s]	Longitud de hilo [mm]	Volumen de material aportado [mm <sup>3</sup> ]	Masa del material aportado [g]
1	64	1600	804,2	6,3
2	64	3200	1608,5	12,6
3	32	1600	804,2	6,3
4	32	800	402,1	3,2

Prueba 2 (110 A)				
Cordón	Tiempo [s]	Longitud de hilo [mm]	Volumen de material aportado [mm <sup>3</sup> ]	Masa del material aportado [g]
1	73,8	1255,4	631,0	5,0
2	73,8	3101,5	1559,0	12,2
3	36,9	1550,8	779,5	6,1
4	36,9	627,7	315,5	2,5
Prueba 3 (90 A)				
Cordón	Tiempo [s]	Longitud de hilo [mm]	Volumen de material aportado [mm <sup>3</sup> ]	Masa del material aportado [g]
1	96	1248	627,3	4,9
2	96	3552	1785,4	14,0
3	48	1776	892,7	7,0
4	48	624	313,7	2,5

Tabla 15: Tiempo y consumo de material empleado en la experimentación.

El cómputo global de tiempo y consumo de material (longitud de hilo, volumen de material aportado y masa de material aportado) se muestran en la siguiente *Tabla 16*. Con estos datos se podrán realizar estimaciones del coste, tiempo y peso de las experimentaciones realizadas.

Cómputos Globales (Experimentación 1)				
Prueba	Tiempo [s] [min]	Longitud de hilo [mm]	Volumen de material aportado [mm <sup>3</sup> ]	Masa de material aportado [g]
Prueba 1	192,0 [3,2]	7200,0	3619,1	28,4
Prueba 2	221,5 [3,7]	6535,4	3285,0	25,8
Prueba 3	288,0 [4,8]	7200,0	3619,1	28,4
<b>TOTAL</b>	<b>701,5 [11,7]</b>	<b>20935,4</b>	<b>10523,3</b>	<b>82,6</b>

Tabla 16: Cómputos globales de tiempo y consumo de material de las tres pruebas y del total (Experimentación 1).

En la anterior *Tabla 16*, se puede observar que el tiempo total de soldeo en esta experimentación es de 11,7 minutos, que la longitud de hilo necesaria es de aproximadamente 20,9 metros y que la masa del hilo utilizado se estima en 82,6 gramos. Para la realización de la primera prueba (130 A) se va a utilizar un electrodo WL15 de 2,4 mm de diámetro y para las otras dos pruebas (110 A y 90 A) se va a utilizar un electrodo WL15 de 1,6 mm de diámetro. La boquilla o tobera de la antorcha va a ser la misma en todas las pruebas. Se va a utilizar una boquilla del número 5, es decir, de 7,94 mm de diámetro interior y el flujo de gas va a ser de 5 l/min. Conociendo el tiempo de cada prueba se puede estimar el consumo de gas. El consumo de gas de las distintas pruebas se muestra en la siguiente *Tabla 17*.



Consumo de gas de protección (Argón)			
Prueba 1 [Litros]	Prueba 2 [Litros]	Prueba 3 [Litros]	Total [Litros]
16	18,46	24	58,46

Tabla 17: Consumo de gas de protección (Argón) para la realización de la experimentación.

En cuanto a la potencia eléctrica requerida, el fabricante del equipo de soldadura no indica la potencia consumida en cada configuración del equipo, así que, se va a estimar tomando los datos de soldadura. El equipo cuando suelda a 135 A proporciona un voltaje de 25,4 V, por tanto, la potencia requerida para dicha acción de soldeo es de 3.429 W. Para conocer la potencia absorbida por el equipo se debe considerar el rendimiento del equipo. El rendimiento del equipo tampoco es conocido. Estableceremos, por tanto, que el equipo tendrá un consumo máximo en la realización de las pruebas de aproximadamente 3.600 W (contabilizando en este valor la potencia requerida para la electrónica y los motores de la máquina) que corresponde a la máxima potencia de una línea de instalación de 16 A. Obviamente, este factor es una estimación máxima, durante el soldeo lo más probable es que el equipo consuma menor potencia, por tanto, es una estimación al alza. Además, en las pruebas de 110 A y 90 A se requerirá menor potencia. Esta estimación de la potencia sirve para dar una idea de la instalación necesaria y, también, nos permite calcular el consumo máximo de los equipos.

Por otro lado, respecto a la máquina de FA, la mayor demanda de potencia es por parte de los motores, ya que la potencia requerida para la electrónica es despreciable. El fabricante indica que cada uno de los motores paso a paso tiene una potencia nominal de 14 W. Para realizar los distintos movimientos, la máquina dispone de 5 motores paso a paso. En caso de utilizar todos a la vez, la potencia nominal requerida será de 70 W.

En resumen, estimaremos que la potencia máxima total consumida por el total del equipo durante los tiempos de soldeo será de 3.600 W. Y durante los momentos de espera y movimientos en vacío será de 70 W. Es una estimación al alza, lo más probable es que los equipos requieran de menor potencia, de todas formas, es un valor que nos servirá para estimar el consumo máximo operativo, el coste eléctrico máximo y las características de la instalación eléctrica requerida.

En la siguiente *Tabla 18* se muestra la estimación del consumo eléctrico de cada una de las pruebas y del total de la experimentación. En este caso, sólo se realiza una capa y, por tanto, no hay tiempos de espera entre capa y capa. Con estos datos se podrá estimar el coste eléctrico y el impacto medioambiental.

Estimación del consumo de energía eléctrica (Experimentación 1)			
Prueba	Tiempo de soldadura [s] [min] [h]	Potencia en tiempos de soldeo [kW]	Energía eléctrica consumida [kWh]
Prueba 1	192,0 [3,2] [0,053]	3,6	0,19
Prueba 2	221,5 [3,7] [0,062]	3,6	0,22
Prueba 3	288,0 [4,8] [0,080]	3,6	0,29
Total	701,5 [11,7] [0,195]	-	0,7

Tabla 18: Estimación del consumo de energía eléctrica (Experimentación 1).

El metal base deberá tener una composición similar a la del hilo de soldadura (acero al carbono) y un espesor suficiente como para evitar perforaciones y deformaciones del material. Los cordones de soldadura al enfriar pueden contraerse causando deformaciones, se estima que con espesores de metal base por encima de 6 mm será suficiente para mitigar dicho efecto. Si el metal base es demasiado fino, se puede deformar como se muestra en la siguiente *Figura 55*, obviamente, ésta es una problemática indeseada. El metal base deberá tener unas dimensiones superiores a 120 mm x 120 mm y estar limpio. La limpieza del metal base es importante para evitar imperfecciones como incrustaciones y porosidad en la soldadura.



*Figura 55: Deformaciones en una chapa de metal base causadas por las contracciones de los cordones de soldadura.*

En cada una de las distintas pruebas, únicamente, se iniciará el arco una vez. Una vez iniciado, se realizarán los cuatro cordones de forma continua. En el código G se configuran las velocidades y los distintos parámetros de soldadura para que, automáticamente, la máquina realice los procedimientos descritos. El amperaje y el caudal de gas se configurará manualmente antes de cada prueba. El código G para realizar esta prueba experimental se encuentra en el anexo “B2. Código adaptado. Prueba estimación parámetros”. Dicho código G se ha realizado para la realización de la prueba 1, adaptarlo a las pruebas 2 y 3 supone un simple cambio de los parámetros de velocidad de soldeo, altura Z en la iniciación del arco (diferente electrodo) y velocidad del hilo (en código G se programa mediante la longitud de hilo, se comentó, anteriormente, en el apartado “5.3.2. Modificaciones del código G”). Durante la experimentación se deberá colocar la pinza de masa sobre el metal base de forma que no interfiera en los movimientos de la máquina y, se deberá estar atento a los movimientos de la máquina para suspender la experimentación si algo no ocurre según lo planeado.

#### 5.4.3 Análisis de los resultados obtenidos

Tras la realización de la experimentación, se deberá realizar un análisis de los resultados para determinar cuáles son los parámetros de soldadura más adecuados para obtener cordones aptos y de calidad. Estos ensayos serán no destructivos y, el que tomará mayor importancia, será el de la inspección visual (VT), aunque, también, pueden realizarse ensayos mediante líquidos penetrantes (PT) para detectar discontinuidades superficiales o, incluso, ensayos de ultrasonidos (UT) y radiografías (RT) para obtener información de discontinuidades internas y subsuperficiales.

Se tomarán como referencia futura los parámetros de soldadura del cordón que presente menores imperfecciones o defectos. Por tanto, se medirá geométricamente el cordón de mayor calidad para ajustar en el programa laminador el ancho de pared o cordón, el diámetro de la boquilla y la altura de capa.

Mediante el ensayo de inspección visual (VT) obtendremos mucha información sobre la calidad y sanidad de los cordones aplicados. Es un ensayo no destructivo sencillo, de bajo coste y que no requiere de equipos de inspección de alta tecnología. Lo más importante al realizar este tipo de ensayos es el equipo humano. La persona que realice el ensayo debe ser capaz de reconocer las imperfecciones y realizar una valoración fidedigna y objetiva. Por todo esto, se considera que es el mejor ensayo que puede realizarse en esta experimentación. En caso de ser necesario, se podrían realizar otros ensayos para analizar en mayor profundidad el estado de la soldadura, pero la inspección visual es fundamental.

Normas como la UNE-EN ISO 5817:2014 [47] y la UNE-EN ISO 6520-1:2009 [48] marcan las pautas y los niveles de calidad de las uniones soldadas en aceros según las imperfecciones y defectos que éstos presentan. La norma UNE-EN ISO 6520-1:2009 [48] distingue entre imperfección y defecto de la siguiente forma:

- *“Imperfección: Cualquier desviación respecto a la soldadura ideal.”*
- *“Defecto: Cualquier imperfección considerada como no aceptable.”*

Esta misma norma [48] agrupa las imperfecciones en seis grupos:

- **Grietas.** (Grieta, microgrieta, grieta longitudinal, grieta transversal, grieta radial, grieta de cráter, grupo de grietas discontinuas y grietas ramificadas).
- **Cavidades.** (Cavidad, sopladura, poro, sopladuras uniformemente distribuidas, sopladuras agrupadas, sopladuras alineadas, sopladura alargada, sopladura vermicular, picadura, rechupe, rechupe interdentrítico, rechupe de cráter, rechupe de cráter abierto, microrechupe, rechupe interdentrítico y rechupe transgranular).
- **Inclusiones sólidas.** (Inclusiones sólidas, inclusión de escoria, inclusión de fundente, inclusión de óxido, disgregación por películas de óxido e inclusión metálica).
- **Falta de fusión y penetración.** (Falta de fusión y de penetración, falta de fusión, falta de penetración (penetración incompleta), falta de penetración en la raíz e imperfección en sierra).
- **Imperfecciones de forma y dimensión.** (Forma imperfecta, mordedura, contracción en la raíz, mordedura entre pasadas, exceso de sobreespesor, exceso de convexidad, exceso de penetración, ángulo de acuerdo incorrecto, solapamiento, falta de alineación, deformación angular, desfondamiento, perforación, anchura irregular, superficie irregular, etcétera).
- **Otras Imperfecciones.** (Otras imperfecciones, cebado del arco, proyecciones o salpicaduras, salpicaduras de wolframio, superficie de desgarre, residuo de escoria, residuo de fundente, etcétera).

De forma genérica, se describen a continuación algunas de las imperfecciones más usuales en soldadura y las posibles causas y soluciones de éstas.

### Grietas de solidificación

Las grietas de solidificación son causadas porque el baño de fusión se contrae a medida que el cordón se solidifica. La solidificación se produce desde el exterior de la soldadura hacia el interior. Las grietas de solidificación aparecen cuando el material no es capaz de soportar el esfuerzo generado por esta contracción del material. Para evitar este tipo de imperfecciones se puede: utilizar una composición de material menos propensa a la aparición de grietas de solidificación, realizar un cordón con forma ligeramente convexa y reducir la velocidad de soldeo [49].

### Porosidad

Cuando existe gas que queda atrapado dentro del cordón se generan poros en la soldadura. En la *Figura 56 a)* se puede observar un ejemplo de esta imperfección. Las principales causas pueden ser: la utilización de un gas de protección inadecuado, la contaminación del material utilizado, el soldeo de materiales que contienen gases disueltos en su interior y la utilización de parámetros de soldadura inadecuados. Para evitar este tipo de imperfecciones se recomienda utilizar el gas de protección adecuado y asegurarse de cubrir perfectamente la zona a soldar, limpiar las piezas eliminando grasas, óxidos y suciedad, utilizar materiales para el soldeo con garantías y evitar el uso de hilos con fundente y, por último, revisar el correcto funcionamiento del equipo del gas de protección [49].

### Incrustaciones

Las incrustaciones se producen cuando hay elementos extraños que quedan atrapados en el cordón de soldadura. Éstos pueden ser óxidos, restos de disolventes, pinturas, grasa, inclusiones de tungsteno, etcétera. Para evitar las incrustaciones seguiremos recomendaciones similares a las descritas anteriormente para evitar la porosidad, por tanto, se debe mantener la zona a soldar limpia y libre de materiales extraños, el baño de fusión debe quedar perfectamente cubierto por el gas de protección, se debe evitar el uso de materiales de aportación con fundentes y desoxidantes y, también, se debe procurar tocar lo mínimo posible el material a soldar con el electrodo de tungsteno.

### Falta de fusión/penetración

La falta de fusión o penetración ocurre porque no se consigue fundir el metal base de forma adecuada. Se puede producir con mayor facilidad en metales con conductividades térmicas elevadas. En la *Figura 56 b)* se puede observar un ejemplo de esta imperfección. La causa suele estar relacionada con el arco eléctrico, ya sea porque no se han utilizado los parámetros adecuados o porque la posición de la antorcha no era la correcta. Por tanto, para evitar la falta de fusión se recomienda adecuar correctamente los parámetros de soldadura, prestar atención a la posición de soldadura, eliminar el óxido del material, adecuar la velocidad de soldadura y utilizar el gas de protección adecuado [49].

### Mordeduras

La mordedura es una discontinuidad en la forma del pie de la soldadura. Se forman mordeduras cuando el material de aportación es insuficiente y éste no sustituye al metal base fundido. En la *Figura 56 c)* se puede observar un ejemplo de esta imperfección. Para

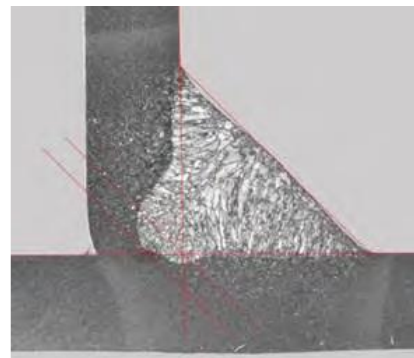
evitar la aparición de mordeduras se debe reducir la velocidad de soldadura, reducir el voltaje del arco, reducir la intensidad, revisar la posición de la antorcha y utilizar el gas de protección adecuado.

### Proyecciones

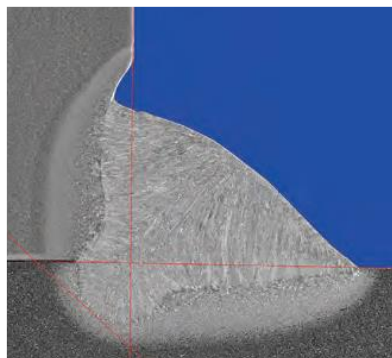
En soldadura GTAW/TIG las proyecciones suelen ser inferiores respecto a otros métodos de soldadura. De todas formas, pueden producirse proyecciones en soldaduras GTAW/TIG cuando existe inestabilidad en el arco eléctrico. Esta inestabilidad hace que la transferencia de material no sea adecuada y provoca que el arco arroje y disperse gotas de material. En la *Figura 56 d)* se puede observar un ejemplo de esta imperfección. Las posibles formas de reducir las proyecciones son: ajustar los parámetros del arco (sobre todo el voltaje), utilizar el gas de protección adecuado, comprobar el buen funcionamiento del equipo de soldadura, comprobar el contacto de la pinza de masa, limpiar la zona a soldar y revisar la posición de la antorcha.



a) Porosidad



b) Falta de fusión/penetración



c) Mordedura

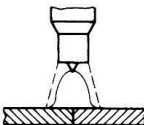
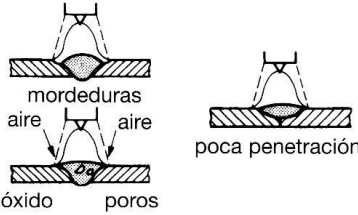

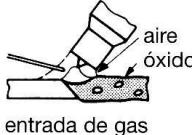

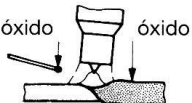
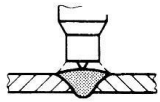
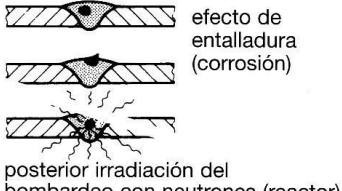


d) Proyecciones

*Figura 56: Ejemplos de imperfecciones en soldaduras. Fuente: [49].*



En la siguiente *Figura 57* se muestran, de forma esquemática, las posibles imperfecciones generadas al realizar determinadas acciones en soldaduras GTAW.

Fallo	Efectos posibles
 Arco demasiado largo	
 Exceso de inclinación de la pistola	
 Demasiado alejado  La varilla, después de la fusión abandona la zona de protección del gas	
 Inclusiones de tungsteno	

*Figura 57: Imperfecciones generadas al realizar determinadas acciones en soldaduras GTAW. Fuente: Diap. 28 [50].*

En la siguiente *Figura 58* se muestran algunos casos más de los posibles defectos e imperfecciones en la deposición de cordones de soldadura individuales, en este caso, mediante tecnología láser de deposición metálica. Dicha figura se ha obtenido del artículo [51].



*Figura 58: Defectos comunes en la deposición de cordones de soldadura individuales. Fuente: Fig. 4 [51].*

## 5.5. Prueba paredes verticales e inclinadas

### 5.5.1 Introducción

Esta segunda prueba experimental se propone con el fin de analizar la adhesión entre capas, ajustar parámetros como la altura de capa, probar el principio de la fabricación aditiva, observar el comportamiento del baño de fusión entre capas y analizar la calidad de una pared a lo largo de su altura. Esta experimentación se acerca ya a lo que se entiende como un proceso de fabricación aditiva, los resultados de esta prueba experimental determinarán en gran medida si se ha conseguido adaptar el proceso de soldadura a FA para la obtención de piezas tridimensionales.

A continuación, se describe la ejecución de las pruebas en el plan de experimentación y, finalmente, se realiza una explicación de como analizar los resultados obtenidos en el apartado “5.5.3. Análisis de los resultados obtenidos”. Este análisis pretende estudiar la buena adhesión de los cordones entre sí y, además, en él se propone el estudio metalográfico para la caracterización microestructural de las piezas obtenidas. En definitiva, esta prueba experimental determinará si la adaptación realizada es válida para la realización de piezas y, también, especificará, en cierta medida, las propiedades y la calidad esperada en dichas piezas.

### 5.5.2 Plan de experimentación

Esta experimentación consta de cinco pruebas experimentales. Son las siguientes:

- **Prueba 1:** Pared simple 30 x 10 mm.
- **Prueba 2:** Pared doble 40 x 8 x 30 mm.
- **Prueba 3:** Prisma oblicuo 40 x 40 x 30 mm inclinado 15° respecto la vertical.
- **Prueba 4:** Pared simple de mayores dimensiones 156 x 54 mm.
- **Prueba 5:** Prisma cuadrangular regular 35 x 35 x 156 mm.

La **prueba 1** consiste en realizar una pared simple. Se entiende como pared simple aquella que está formada por un sólo cordón de soldadura de grosor. Las dimensiones de la pared son de 30 mm de largo por 10 mm de ancho. El grosor de un cordón se aproxima a unos 4 mm (tabla 3 de [52]). El código de esta prueba se ha realizado de forma totalmente manual por la sencillez de ser una pared recta. Respecto a los parámetros del equipo, lo ideal sería programar el código para trabajar con los parámetros “ideales” obtenidos en la anterior experimentación “5.4. Prueba estimación parámetros equipo”, debido a que no se han podido realizar las experimentaciones, se ha programado el código G con unos parámetros estimados a partir del artículo [52]. Éstos son los mostrados en la siguiente *Tabla 19*.

Pared simple 30x10 mm			
Altura de capa [mm]	2	Velocidad soldeo [mm/s] [mm/min]	3 [180]
Número de capas	5	Velocidad hilo [mm/s] [mm/min] [m/min]	25 [1500] [1,5]

Tabla 19: Parámetros utilizados para la generación del código G (prueba 1).

Para calcular la longitud de hilo utilizada en cada una de las capas, se ha realizado una hoja de cálculo. En esta hoja de cálculo, se tiene en cuenta el movimiento de la antorcha y la velocidad de soldeo. Con esto se calcula el tiempo invertido en cada cordón y, finalmente, mediante la velocidad de hilo, se calcula la longitud de hilo aportada en cada cordón y la acumulada. El valor de longitud acumulada se debe introducir en la coordenada E del código G con el fin de aportar el material justo y necesario. Este procedimiento permite obtener la longitud total de material de aportación y, también, permite calcular el tiempo de fabricación, el consumo de gas y la masa del material aportado. Dicha hoja de cálculo, el procedimiento y el código G obtenido se muestran de forma detallada en el anexo “B3.1. Pared simple 30 x 10 mm (Prueba 1)”.

El tiempo total invertido en la prueba 1 se computa como la suma del tiempo de soldeo, el tiempo de inicio y estabilización del arco y el tiempo de estabilización del material. Entre capa y capa se realiza una pequeña espera para la estabilización del material de 10 segundos. El tiempo de iniciación del arco, estabilización y corte se estima entorno a los 4 segundos. Por tanto, al tiempo de soldeo de cada una de las capas (26 segundos) hay que añadir 14 segundos. En la siguiente *Tabla 20* se muestran los tiempos totales invertidos en cada parte.

Pared simple 30x10 mm		
Tiempo de soldeo [s] [min]	Tiempo de inicio y estabilización del arco + tiempo de estabilización del material [s] [min]	Tiempo total [s] [min]
130 [2,17]	70 [1,17]	200 [3,34]

Tabla 20: Tiempos estimados para la realización de la prueba 1.

La longitud de hilo, el volumen de material aportado, la masa de material, el consumo de gas y el consumo eléctrico de esta prueba se muestra en los cálculos globales de la experimentación en las *Tabla 29*, *Tabla 30*, *Tabla 31* y *Tabla 32*. Los demás datos pueden consultarse en el anexo “B3.1. Pared simple 30 x 10 mm (Prueba 1)”.

La **prueba 2** consiste en realizar una pared doble. Se entiende como pared doble aquella formada por dos cordones de soldadura contiguos. Las dimensiones de la pared son, por tanto, 40 mm de longitud, aproximadamente 8 mm de grosor y 30 mm de alto. En esta prueba 2, la programación se ha realizado a partir de un fichero CAD. El CAD y el resultado obtenido por el laminador se muestran en la siguiente *Figura 59*.

Con la elección de los parámetros ocurre exactamente lo mismo que lo descrito en la prueba 1. Éstos se muestran en la siguiente *Tabla 21*.

Pared doble 40x8x30 mm			
Altura de capa [mm]	2	Velocidad soldeo [mm/s] [mm/min]	3 [180]
Número de capas	15	Velocidad hilo [mm/s] [mm/min] [m/min]	25 [1500] [1,5]

Tabla 21: Parámetros utilizados para la realización del código G (prueba 2).

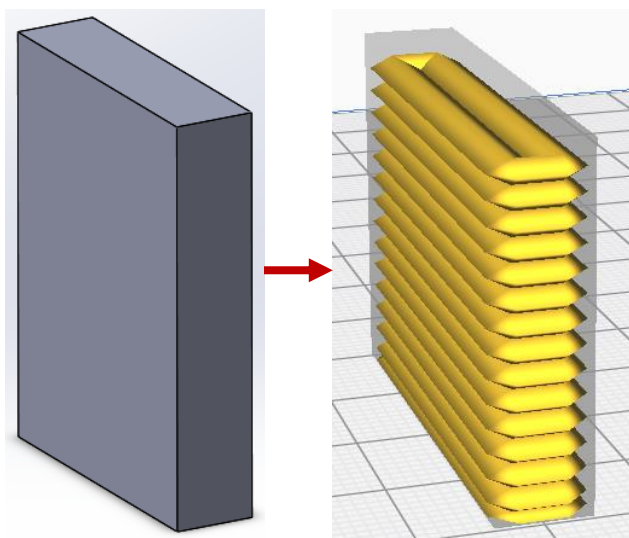


Figura 59: A la izquierda el CAD de partida, a la derecha, el resultado obtenido mediante el laminador.

En esta prueba el tiempo de soldeo de cada una de las capas es de 26,6 segundos. El tiempo de espera, de inicio y de estabilización del arco es el mismo que en la prueba 1, es decir, 14 segundos por capa. El resumen del tiempo invertido en cada parte se muestra a continuación en la *Tabla 22*.

Pared doble 40x8x30 mm		
Tiempo de soldeo [s] [min]	Tiempo de inicio y estabilización del arco + tiempo de estabilización del material [s] [min]	Tiempo total [s] [min]
400 [6,67]	210 [3,5]	<b>610 [10,2]</b>

Tabla 22: Tiempos estimados para la realización de la prueba 2.

El código G y las tablas detalladas de la prueba 2 pueden consultarse en el anexo “B3.2. Pared doble 40 x 8 x 30 mm (Prueba 2)”. La longitud de hilo, el volumen de material aportado, la masa de material y el consumo de gas de esta prueba 2 se muestran resumidos en los cálculos globales de esta experimentación. Consultar la *Tabla 29* y la *Tabla 30*. Además, en las *Tabla 31* y *Tabla 32* se realiza una estimación del consumo eléctrico.

La **prueba 3** consiste en realizar un prisma oblicuo de 40 x 40 x 30 mm e inclinado 15° respecto la vertical. La base de dicho prisma es cuadrada de dimensiones 40 x 40 mm y el prisma tiene una altura de 30 mm. En esta prueba 3 la laminación se ha realizado de igual forma que en la prueba 2, se ha partido de un fichero CAD y se ha seccionado el sólido con el laminador, posteriormente, se ha procedido a la modificación manual del código G obtenido con el fin de adaptarlo al proceso GTAW/TIG. Este proceso se muestra en la siguiente *Figura 60*.

Con la elección de los parámetros ocurre exactamente lo mismo que lo descrito en las anteriores pruebas 1 y 2. Los parámetros utilizados en la programación de las trayectorias se muestran en la siguiente *Tabla 23*.

Prisma oblicuo 40 x40 x 30 mm. Inclinación de 15° respecto la vertical.			
Altura de capa [mm]	2	Velocidad soldeo [mm/s] [mm/min]	3 [180]
Número de capas	15	Velocidad hilo [mm/s] [mm/min] [m/min]	25 [1500] [1,5]

Tabla 23: Parámetros utilizados en la realización del código G (prueba 3).

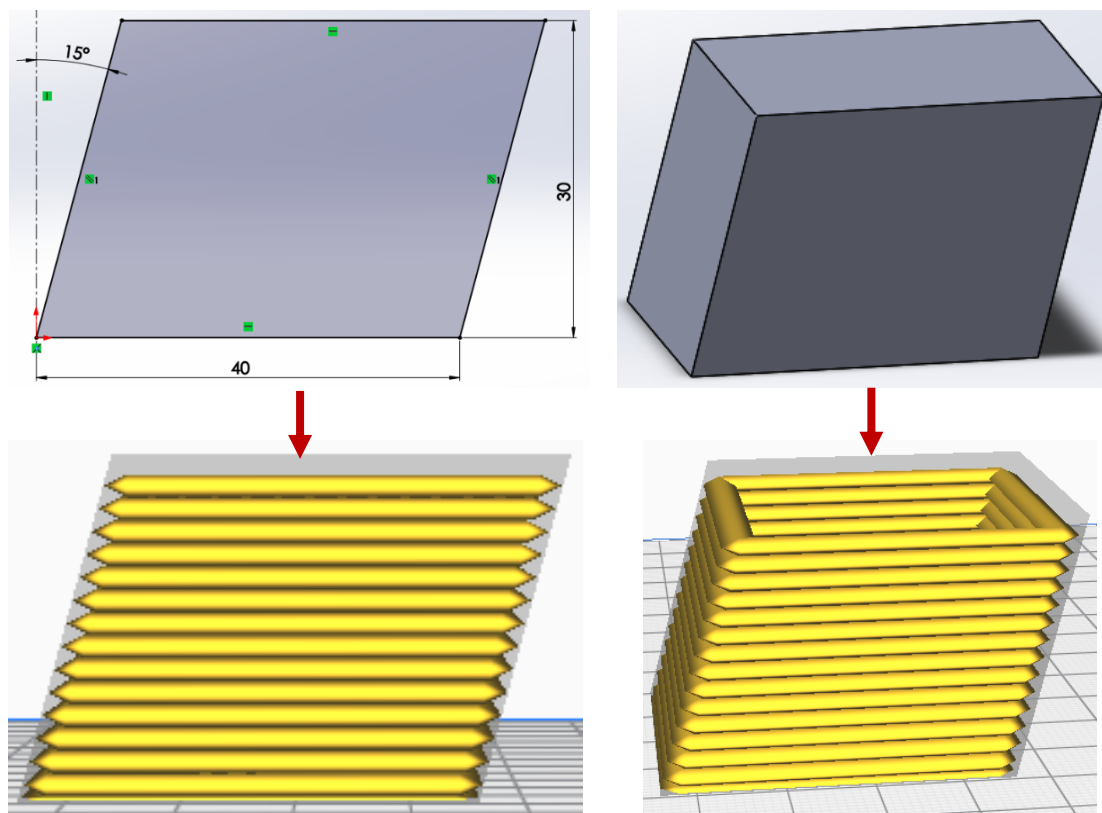


Figura 60: En la parte superior se muestra el modelo CAD de partida y, en la parte inferior, el resultado obtenido del laminador.

El tiempo de soldadura invertido en esta prueba 3 es de 12 segundo por cordón lateral, es decir, 48 segundos por capa; o lo que es lo mismo, un tiempo total de soldeo de 720 segundo. Si a esto sumamos los 14 segundos de estabilización del material por capa (como en las pruebas anteriores), obtenemos un tiempo total de fabricación de 930 segundos (15,5 minutos). En la siguiente *Tabla 24* se resumen dichos valores.

Prisma oblicuo 40 x40 x 30 mm. Inclinación de 15° respecto la vertical.		
Tiempo de soldeo [s] [min]	Tiempo de inicio y estabilización del arco + tiempo de estabilización del material [s] [min]	Tiempo total [s] [min]
720 [12]	210 [3,5]	930 [15,5]

Tabla 24: Tiempos estimados para la realización de la prueba 3.

El cálculo de la cantidad de material a aportar, en este caso, se simplifica. Esto es debido a las características de la pieza. La sección de la pieza permanece invariante en las distintas capas, se desplaza, pero no modifica la longitud de los cordones (36 mm cada



lado). Esto es así porque la base es cuadrada y los parámetros son los mismos para todas las capas. En definitiva, como todos los cordones son iguales, solamente es necesario calcular el material de aporte por cordón una vez y replicarlo en los siguientes. En el anexo “B3.3. *Prisma oblicuo inclinado 15° respecto la vertical (Prueba 3)*” se muestran todos los pasos realizados y el código G obtenido. Finalmente, en las siguientes *Tabla 29* y *Tabla 30* se muestran los cálculos globales del tiempo invertido, el gasto de material de aportación y el consumo de gas de protección. Además, en las *Tabla 31* y *Tabla 32* se realiza una estimación del consumo eléctrico.

Las siguientes **prueba 4** y **prueba 5** se realizan en esta experimentación, pero se reutilizan en la siguiente experimentación “5.6. *Realización de probetas*”.

La **prueba 4** se basa en realizar una pared vertical simple de mayores dimensiones. Este tipo de pared será muy útil para el plan de experimentación mostrado en el apartado “5.6. *Realización de probetas*”. Esta pared se utilizará en este plan experimental para su estudio metalográfico, pero puede utilizarse el mismo código G desarrollado en esta prueba para otros planes experimentales (realización de probetas). Dicho esto, la pared creada en esta prueba 4 es una pared simple, es decir, del grosor de un cordón de soldadura. La pared tiene unas dimensiones de 156 mm de largo y 54 mm de alto. El código G de esta prueba se ha desarrollado de forma totalmente manual.

Con la elección de los parámetros ocurre exactamente lo mismo que lo descrito en las anteriores pruebas. Los parámetros utilizados en la programación de las trayectorias de esta prueba se muestran en la siguiente *Tabla 25*.

Pared simple de grandes dimensiones 156 x 54 mm			
Altura de capa [mm]	2	Velocidad soldeo [mm/s] [mm/min]	3 [180]
Número de capas	27	Velocidad hilo [mm/s] [mm/min] [m/min]	25 [1500] [1,5]

Tabla 25: Parámetros utilizados en la realización del código G (prueba 4).

El tiempo de soldeo es de 50,7 segundos por capa. Con un total de 27 capas, el tiempo de soldeo total es de 1.368 segundos. En cuanto a los tiempos de espera, iniciación del arco y estabilización del material; se considera el mismo tiempo por capa que en las pruebas anteriores, 14 segundos. Contabilizando todos estos tiempos, se estima el tiempo total de fabricación en 1.746 segundos (29,1 minutos). En la siguiente *Tabla 26* se resumen dichos valores.

Pared simple de grandes dimensiones 156 x 54 mm		
Tiempo de soldeo [s] [min]	Tiempo de inicio y estabilización del arco + tiempo de estabilización del material [s] [min]	Tiempo total [s] [min]
1.368 [22,8]	378 [6,3]	1.746 [29,1]

Tabla 26: Tiempos estimados para la realización de la prueba 4.

El cálculo de la cantidad de material de aportación es sencillo por la naturaleza de esta prueba (cordones rectos). La antorcha se desplaza 152 mm y se aporta una longitud total de material de 1.266,7 mm en la realización de cada cordón. En el anexo “B3.4. Pared simple de mayores dimensiones 156 x 54 mm (Prueba 4)” se muestran todos los pasos realizados, todas las tablas y el código G necesario para la realización de esta prueba. Finalmente, en las siguientes *Tabla 29* y *Tabla 30* se muestran los cálculos globales del tiempo invertido, el gasto de material de aportación y el consumo de gas de protección. Además, en las *Tabla 31* y *Tabla 32* se realiza una estimación del consumo eléctrico.

La **prueba 5** se basa en realizar un prisma cuadrangular de pared simple y de dimensiones 35 x 35 x 156 mm. En esta prueba se pretende realizar una pared de mayor altura. Al realizar una sola pared de tanta altura, ésta se puede combar. Para evitar esto, se ha decidido realizar las paredes en forma de prisma para ofrecer mayor estabilidad a la pieza. De esta prueba se podrán extraer probetas que serán utilizadas en la siguiente experimentación “5.6. Realización de probetas”. En este caso, para la realización del código G se ha partido de un fichero CAD con la geometría estipulada y, posteriormente, mediante el programa laminador se han generado las trayectorias de la máquina. Tras obtener el código G del laminador, éste se ha modificado para adaptarlo al proceso de fabricación utilizado, tal y como se ha venido mostrando hasta ahora. En la siguiente *Figura 61* se muestra la primera parte del proceso. El código G para la realización de esta prueba se muestra en el anexo “B3.5. Prisma cuadrangular regular 35 x 35 x 156 mm (Prueba 5)”.

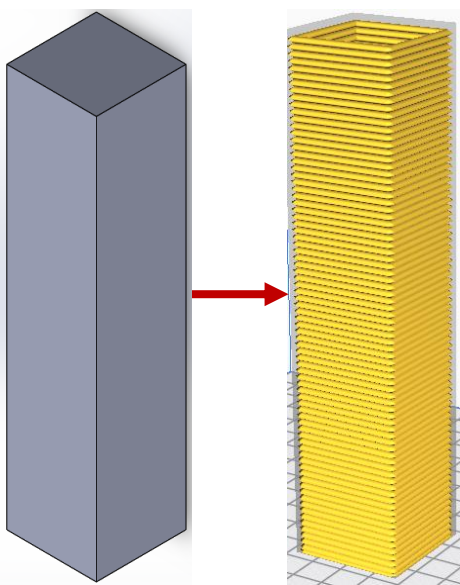


Figura 61: En la parte izquierda se muestra el modelo CAD de partida y, en la parte derecha, el resultado obtenido del laminador.

Con la elección de los parámetros ocurre exactamente lo mismo que lo descrito en las anteriores pruebas. Los parámetros utilizados en la programación de las trayectorias de esta prueba se muestran en la siguiente *Tabla 27*.

Prisma cuadrangular regular 35 x 35 x 156 mm			
Altura de capa [mm]	2	Velocidad soldeo [mm/s] [mm/min]	3 [180]
Número de capas	78	Velocidad hilo [mm/s] [mm/min] [m/min]	25 [1500] [1,5]

Tabla 27: Parámetros utilizados en la realización del código G (prueba 5).

El tiempo de soldeo es de 10,33 segundos por lado, es decir, de 41,32 segundos por capa. Con un total de 78 capas, el tiempo de soldeo total es de 3.224 segundos. En cuanto a los tiempos de espera, iniciación del arco y estabilización del material; se considera el mismo tiempo por capa que en las pruebas anteriores, 14 segundos. Contabilizando todos estos tiempos, se estima el tiempo total de fabricación en 4.316 segundos (71,93 minutos). En la siguiente *Tabla 28* se resumen dichos valores.

Prisma cuadrangular regular 35 x 35 x 156 mm		
Tiempo de soldeo [s] [min]	Tiempo de inicio y estabilización del arco + tiempo de estabilización del material [s] [min]	Tiempo total [s] [min]
3.224 [53,73]	1.092 [18,2]	<b>4.316 [71,93]</b>

Tabla 28: Tiempos estimados para la realización de la prueba 5.

El cálculo de la cantidad de material aportado se realiza de la misma forma que en pruebas anteriores. La antorcha se desplaza 31 mm por lado, aportando una longitud de material de 258,3 mm, es decir, en una capa, la antorcha se desplaza un total de 124 mm y, por tanto, se aporta una longitud de material de 1033,3 mm en cada capa. Estos cálculos pueden realizarse fácilmente mediante una hoja de cálculo. En el anexo “B3.5. Prisma cuadrangular regular 35 x 35 x 156 mm (Prueba 5)” se muestran todos los pasos realizados, todas las tablas y el código G necesario para la realización de esta prueba.

A continuación, se presentan cuatro tablas (*Tabla 29*, *Tabla 30*, *Tabla 31* y *Tabla 32*) con los cálculos globales del material aportado, tiempo invertido, consumo de gas y consumo eléctrico de todas las pruebas. El consumo de gas de protección se ha calculado para un caudal de 5 l/min sobre el tiempo total de la prueba, ya que el equipo de soldadura no tiene electroválvula para abrir y cerrar el paso de gas de forma automática. Estos datos servirán para realizar estimaciones de costes, de tiempos de fabricación y de masa de las piezas fabricadas. El volumen de material aportado se ha calculado mediante la longitud de hilo aportado y suponiendo sección circular de 0,8 mm de diámetro (diámetro del hilo). La masa de material aportado se ha calculado tomando la densidad media del acero de 7.850 kg/m<sup>3</sup>.

Consumo de gas de protección (Argón)					
Prueba 1 [Litros]	Prueba 2 [Litros]	Prueba 3 [Litros]	Prueba 4 [Litros]	Prueba 5 [Litros]	Total [Litros]
16,7	51	77,5	145,5	359,65	<b>650,35</b>

Tabla 29: Cálculos globales del consumo de gas de protección (Argón) de las cinco pruebas y del total.

Còmputos Globales				
Prueba	Tiempo [s] [min]	Longitud de hilo [mm]	Volumen de material aportado [mm <sup>3</sup> ]	Masa de material aportado [g]
Prueba 1	200 [3,33]	1.083,3	544,53	4,27
Prueba 2	610 [10,17]	10.000	5.026,55	39,46
Prueba 3	930 [15,5]	18.000	9.047,79	71,03
Prueba 4	1.746 [29,1]	34.200	17.190,80	134,95
Prueba 5	4.316 [71,93]	80.600	40.513,98	318,03
<b>TOTAL</b>	<b>7.802 [130,03]</b>	<b>143.883,3</b>	<b>72.323,65</b>	<b>567,74</b>

Tabla 30: Còmputos globales de tiempo y consumo de material de las cinco pruebas y del total.

Para la estimación del consumo de energía eléctrica, se ha realizado el cálculo de igual forma a lo anteriormente presentado en la primera experimentación. En las siguientes *Tabla 31* y *Tabla 32* se muestra la estimación del consumo eléctrico de cada una de las pruebas y del total de la experimentación. Con estos datos se podrá estimar el coste eléctrico y el impacto medioambiental.

Estimación del consumo de energía eléctrica (Experimentación 2)				
Prueba	Tiempo de soldadura [s] [min] [h]	Potencia en tiempos de soldeo [kW]	Tiempo de espera [s] [min] [h]	Potencia en tiempos de espera [kW]
Prueba 1	130 [2,17] [0,036]	3,6	70 [1,17] [0,019]	0,07
Prueba 2	400 [6,67] [0,111]	3,6	210 [3,5] [0,058]	0,07
Prueba 3	720 [12] [0,200]	3,6	210 [3,5] [0,058]	0,07
Prueba 4	1.368 [22,8] [0,380]	3,6	378 [6,3] [0,105]	0,07
Prueba 5	3.224 [53,73] [0,896]	3,6	1.092 [18,2] [0,303]	0,07
<b>Total</b>	<b>5.842 [97,37] [1,623]</b>	<b>-</b>	<b>1.960 [32,67] [0,543]</b>	<b>-</b>

Tabla 31: Estimación del consumo de energía eléctrica (Experimentación 2).

Estimación del consumo de energía eléctrica (Experimentación 2)			
Prueba	Energía eléctrica consumida en tiempos de soldeo [kWh]	Energía eléctrica consumida en tiempos de espera [kWh]	Energía eléctrica consumida en el total de la prueba [kWh]
Prueba 1	0,130	0,001	0,131
Prueba 2	0,400	0,004	0,404
Prueba 3	0,720	0,004	0,724
Prueba 4	1,368	0,007	1,375
Prueba 5	3,226	0,021	3,247
Total	5,844	0,037	5,881

Tabla 32: Estimación del consumo de energía eléctrica (Experimentación 2).

### 5.5.3 Análisis de los resultados obtenidos

Las pruebas experimentales descritas en esta experimentación tienen gran importancia en el desarrollo de este estudio. La transcendencia de éstas es tal que, pueden definir el diseño de la maquinaria realizada como apto para FA. El conjunto de las pruebas pormenorizadas, se asemejan a casos reales de fabricación y, además, se introduce la tercera dimensión en el proceso. El análisis de los resultados arrojará conclusiones clave, puesto que esta experimentación, se acerca a lo que se entiende como un proceso de FA. A continuación, se exponen los principales factores que deben ser analizados en cada una de las pruebas.

Obviamente, se deberá realizar una primera inspección de todas y cada una de las pruebas en busca de defectos. La forma de realizar esta primera inspección ya se ha descrito en la experimentación anterior “5.4.3. *Análisis de los resultados obtenidos*” mediante el uso de ensayos VT, PT, UT y/o RT. También, se realizarán comprobaciones dimensionales.

La **prueba 1** de esta experimentación se plantea con el objetivo principal de comprobar la adhesión entre capas, ajustar el parámetro de altura de capa, observar el comportamiento del baño de fusión entre capas y probar el principio de la FA. La forma de analizar la adhesión entre capas será mediante inspección visual. Se propone realizar una primera inspección y, posteriormente, se plantea efectuar un fresado de la superficie con el fin de observar la fusión entre cordones en el interior de la pared. Si durante la realización de la prueba 1 se ha observado una mala iniciación del arco o un exceso de proyecciones, éstas pueden haber sido provocadas por un mal ajuste de la altura de capa. Si en la pieza obtenida se observa una falta de adhesión entre capas, esto puede haber sido provocado por una falta de penetración en la soldadura debida a un mal ajuste de los parámetros eléctricos o a un mal afilado del electrodo, entre otros. Por tanto, esta primera prueba, también, será una prueba que permitirá ajustar los distintos parámetros de fabricación.

En la **prueba 2** se pretende observar la adhesión entre cordones de soldadura contiguos al realizar paredes dobles. Se realizarán varios cortes de sección a la pared para comprobar si los cordones se han adherido correctamente entre sí. Si éstos quedan con una separación



o una cámara de aire entre medias, se deberán ajustar las trayectorias de la máquina para que ambos cordones se realicen a menor distancia entre ellos. Esta distancia de separación, generada en la programación de las trayectorias, puede verse influida por el diámetro de boquilla elegido en el programa de laminación. Se deberá, por tanto, ajustar dicho parámetro y comprobar que en el código G se reduce el espaciado entre cordones. En la siguiente *Figura 62* extraída del estudio [51], se puede observar la correcta adhesión entre cordones contiguos (a) y, también, se pueden observar las ondulaciones producidas por una excesiva separación entre cordones (b), los poros producidos por una incorrecta relación de aspecto (c) y las microgrietas producidas por una incorrecta elección en la potencia de soldeo (d).

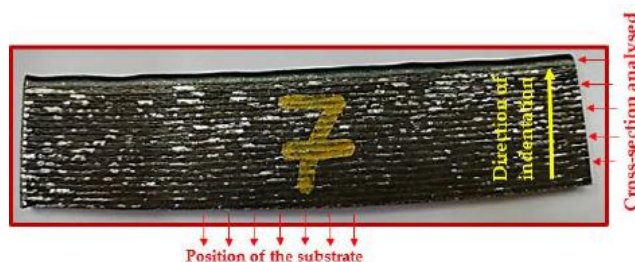


a) Ejemplo de una deposición correcta entre cordones contiguos.      b) Superficie ondulada debido a una excesiva separación entre cordones.      c) Formación de poros debido a una incorrecta relación de aspecto.      d) Aparición de microgrietas debido a una potencia incorrecta.

*Figura 62: Defectos comunes en la deposición de cordones de soldadura superpuestos o contiguos. Fuente: Fig. 5 [51]*

La **prueba 3** se ha diseñado con el fin de observar el comportamiento del baño de fusión en el soldeo de cordones que no están alineados verticalmente. La prueba propuesta incluye una desviación de  $15^\circ$  respecto la vertical, pero se pueden realizar pruebas con inclinaciones distintas con el fin de determinar los gradientes máximos asumibles en este tipo de tecnologías. Esta prueba limitará las inclinaciones asumibles en las piezas e indicará a partir de qué gradientes es necesario añadir tirantes o soportes. La forma de analizar si las inclinaciones son aptas o no será, básicamente, mediante inspección visual. En esta inspección se valorará si el material se ha adherido correctamente o si, por el contrario, éste se ha desbordado o rebosado. Este hecho se apreciará rápidamente por la aparición de formas extrañas en la pieza, huecos, chorreos o por la aparición de pegotes en el metal base.

Finalmente, las **pruebas 4 y 5** se proponen en esta experimentación con el fin de analizar qué sucede al realizar piezas de mayores dimensiones. Estas pruebas serán muy útiles en la siguiente experimentación “5.6. *Realización de probetas*” para obtener las probetas a tracción necesarias. De todas formas, se han incluido en esta experimentación porque se pueden extraer datos muy interesantes de ellas. En piezas de grandes dimensiones se podrán observar las deformaciones producidas por las contracciones de los cordones de soldadura al enfriar, en la siguiente *Figura 63* extraída del artículo [52], se muestra un ejemplo.



*Figura 63: Ejemplo de las deformaciones producidas por las contracciones de los cordones de soldadura al enfriar. Fuente: Fig. 4 [52].*

Además, las piezas obtenidas en las **pruebas 4 y 5** se someterán a un estudio metalográfico, mediante el cual, se obtendrá una caracterización microestructural de éstas. Esto permitirá analizar y estudiar la calidad de una pared a lo largo de su altura y, también, especificará, en cierta medida, las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas. Las características de la microestructura a analizar mediante un estudio metalográfico son: el tamaño de grano, los límites de grano, el tamaño, forma y distribución de las fases y, el porcentaje y morfología de los precipitados y de las inclusiones no metálicas.

Los pasos para la obtención de probetas, generalmente, son los siguientes: corte metalográfico (se controla la temperatura para no influir en la microestructura), desbaste o lijado, pulido y ataque químico. En la norma internacional ASTM E3-11 [53] se indican los procedimientos para la obtención de probetas metalográficas.

Para el análisis metalográfico se van a extraer probetas de la parte baja (cercana a la plataforma), media y alta de la pieza. Con esto se pretende observar la microestructura generada a lo largo del eje Z y la afectación del material debido a las temperaturas generadas durante el soldeo.

De forma genérica, en uniones soldadas, se identifica la zona cercana al cordón de soldadura como zona afectada térmicamente (ZAT). Esta zona se caracteriza por experimentar cambios microestructurales que pueden afectar a las características mecánicas de la unión. Estos cambios microestructurales se producen por el calentamiento y enfriamiento del metal. Cuando el enfriamiento es rápido (velocidad de enfriamiento superior a la velocidad de enfriamiento crítica), los átomos no tienen el suficiente tiempo para acomodarse y se forman estructuras martensíticas en el metal. La microestructura martensítica genera un metal de gran dureza, pero de alta fragilidad. Es posible que se forme esta microestructura en la zona ZAT. Este tipo de microestructura martensítica no interesa que se presente en las piezas soldadas porque puede generar la aparición de fisuras que pueden causar defectos y piezas frágiles. Para evitar la formación de estructuras martensíticas se puede: precalentar el material a soldar y, también, se puede controlar la temperatura generada durante el proceso de soldeo mediante la regulación de ciertos parámetros como, la intensidad.

La zona ZAT suele estar situada entre el cordón y el metal base. En las piezas realizadas mediante la tecnología propuesta en este estudio, la zona ZAT puede extenderse a lo largo del eje Z, ya que no existe metal base a los lados de los cordones aplicados que “disipe” el calor generado durante el soldeo. El análisis metalográfico a distintas alturas permitirá ver si esto es así o no.

Cuando se sueldan aceros hay que tener presente el contenido de carbono de éstos, ya que determinará la microestructura de éstos. Los aceros pueden clasificarse en tres grupos según su contenido en carbono: Hipoeutectoides, eutectoides y hipereutectoides.

Los aceros eutectoides son aquellos que contienen exactamente 0,83 % de carbono. Presentan una estructura totalmente perlítica (láminas de ferrita con láminas de cementita).

Los aceros hipoeutectoides son aquellos que tienen un contenido inferior al 0,83 % de carbono. Presentan una estructura ferrítico-perlítica (granos de ferrita + granos de perlita).

Por último, los aceros hipereutectoides son aquellos que tienen un contenido de carbono superior al 0,83 %. Presentan una estructura formada por una mezcla de perlita y cementita [10].

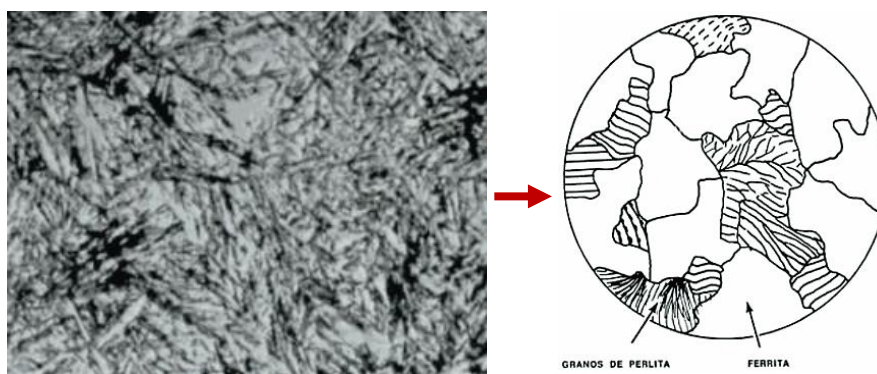
Por tanto, conocer el tipo de acero es clave para realizar un plan de soldeo adecuado. Por ejemplo, en aceros de alto contenido en carbono es más sencillo que se produzcan estructuras martensíticas, endurecimiento y fisuras y, por tanto, es necesario controlar las temperaturas durante el proceso.

Generalmente, se trabaja con aceros con bajos contenidos de carbono (hipoeutectoides). De hecho, el acero del material de aportación utilizado en este estudio es hipoeutectoide porque presenta contenidos de carbono de entre 0,06 % y 0,15 %. Por tanto, existe menor riesgo a la formación de estructuras martensíticas y a la fisuración. De todas formas, pueden producirse este tipo de microestructuras si la velocidad de enfriamiento es alta.

La microestructura obtenida podrá modificarse aplicando tratamientos térmicos posteriores. De hecho, lo más probable, es que, todas las piezas fabricadas mediante esta tecnología de FA requieran de, como mínimo, un tratamiento térmico de recocido para la eliminación de las tensiones internas generadas.

La velocidad de enfriamiento será la responsable de generar una u otra microestructura. Con velocidades de enfriamiento lentas se obtendrán estructuras perlíticas de grano grueso. Si el enfriamiento es algo más rápido se obtendrán estructuras perlíticas de grano fino. Y, si el enfriamiento es rápido, se obtendrán estructuras martensíticas.

Es lógico y normal que, mediante el proceso de FA utilizado en este estudio, se generen estructuras que requieran ser restauradas con el fin de eliminar tensiones internas y de obtener una mayor ductilidad y resistencia. La aplicación de un tratamiento térmico (recocido o normalizado) transformará esta estructura martensítica en una estructura granular ferrítico-perlítica. En la siguiente *Figura 64* se muestran ambas microestructuras. A la izquierda la microestructura martensítica y a la derecha la microestructura ferrítico-perlítica.



*Figura 64: A la izquierda, se muestra una microestructura martensítica y, a la derecha, un esquema de una microestructura ferrítico-perlítica. Fuente: Fig. 3-4 y Fig. 3-6 de [10].*

Las piezas generadas mediante esta tecnología de FA pueden presentar diversas microestructuras a lo largo de su altura. El análisis metalográfico nos arrojará información sobre la microestructura obtenida y, también, nos arrojará información sobre las temperaturas generadas durante el proceso de soldeo y las propiedades mecánicas finales de las piezas obtenidas. La información obtenida mediante el análisis metalográfico será de gran valor y ayudará a realizar planes de fabricación, permitiendo obtener piezas de mayor calidad con microestructuras controladas. Arrojará, también, la necesidad de realizar o no ciertos tratamientos térmicos.

## 5.6. Realización de probetas

### 5.6.1 Introducción

Esta tercera prueba experimental se propone con el fin de analizar las características mecánicas obtenidas en las piezas fabricadas mediante esta tecnología de FA. Se propone, por tanto, realizar diversas probetas con la maquinaria de este estudio y someterlas a ensayos a tracción. Estas probetas serán depositadas en distintos planos para estudiar los efectos ligados a la dirección de deposición y a la anisotropía de las piezas generadas.

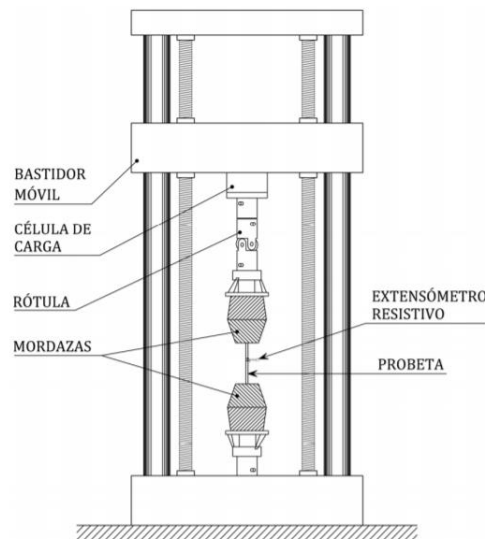
A continuación, en el apartado “5.6.2. *Plan de experimentación*” se detallan los correspondientes ensayos y probetas. Finalmente, se realiza una explicación de como analizar los resultados obtenidos en el apartado “5.6.3. *Análisis de los resultados obtenidos*”. Este análisis pretende comparar los diagramas de tensión-deformación de las distintas probetas generadas y, también, comparar las propiedades mecánicas de las probetas obtenidas con las propiedades mecánicas generales del material en bloque. En definitiva, esta prueba experimental caracterizará las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas y arrojará las diferencias existentes en las distintas técnicas de deposición del material y en los posteriores tratamientos térmicos.

### 5.6.2 Plan de experimentación

Esta experimentación pretende caracterizar las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas mediante la máquina desarrollada en este estudio. Para obtener unos datos consistentes se van a realizar distintos ensayos destructivos. En este caso, se van a realizar ensayos a tracción bajo norma UNE-EN ISO 6892-1:2017 [54], también se podrían realizar ensayos de fractura, bajo norma ASTM E399 [55], y de fatiga, bajo norma ASTM E466-15 [56], entre otros. Pero en esta experimentación sólo se van a realizar ensayos a tracción.

La elección del tipo de ensayo puede ser compleja, ya que el método de fabricación no es común y, además, la estandarización de las distintas tecnologías de FA está en constantes cambios. Actualmente, existen algunas normas para la realización de ensayos en probetas fabricadas mediante FA, un ejemplo de ello es la norma UNE-EN ISO 17296-3:2017 [57], pero, como ya se ha comentado anteriormente, las tecnologías de FA han nacido hace relativamente poco tiempo y la estandarización aún está adaptándose. Es por esto por lo que, en este estudio, se ha decantado por la realización de ensayos a tracción bajo la norma estándar de ensayos a tracción de materiales metálicos a temperatura ambiente UNE-EN ISO 6892-1:2017 [54].

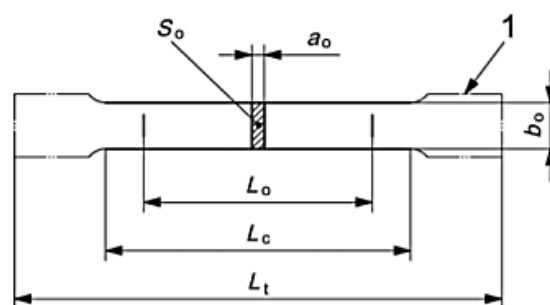
Los ensayos a tracción son ensayos destructivos que consisten en someter la probeta a un esfuerzo axial de tracción hasta su rotura. Este tipo de ensayos se realizan a velocidades bajas y, por tanto, sirven para determinar la resistencia del material frente a fuerzas estáticas o de aplicación lenta. En la siguiente *Figura 65* se muestra un esquema del procedimiento del ensayo a tracción simple.



*Figura 65: Esquema de ensayo a tracción simple.*  
 Fuente: Fernández G., I. Pág. 14. [58].

La norma UNE-EN ISO 6892-1:2017 [54] es válida para probetas de sección rectangular de 0,1 a 3 mm de espesor ( $a_0$ ). Si las probetas a ensayar tienen un espesor de 5 mm o mayor, se debe recurrir a la norma ASTM E8 [59]. En este caso, las probetas no van a exceder de 3 mm porque se van a realizar con pared simple, consecuentemente, esta experimentación se basará en la norma UNE-EN ISO 6892-1:2017 [54].

La geometría de la probeta puede modificarse siguiendo las pautas marcadas por la norma, en este caso, se van a realizar las probetas con la geometría recomendada en dicha norma. Esta geometría se esquematiza en la siguiente *Figura 66* y se muestran los valores en la siguiente *Tabla 33*. Las tolerancias admitidas en el ancho de la probeta se muestran en la siguiente *Tabla 34*.



*Figura 66: Esquema de la geometría de probetas a tracción según norma UNE-EN ISO 6892-1:2017 [54].*



Dimensiones recomendadas de una probeta de sección rectangular		
Dimensión	Designación	[mm]
Longitud del calibre	$L_0$	80,0
Anchura	$b_0$	$20,0 \pm 1,0$
Longitud de la sección paralela reducida (Mínima)	$L_c$	90,0
Longitud de la sección paralela reducida (Recomendada)	$L_c$	120,0
Longitud libre entre las empuñaduras	$L_t$	140,0
Espesor	$a_0$	3,0

Tabla 33: Dimensiones recomendadas de una probeta de sección rectangular para ensayos de tracción a temperatura ambiente según norma UNE-EN ISO 6892-1:2017 [54].

Tolerancias en el ancho de la probeta		
Ancho nominal de la probeta ( $b_0$ ) [mm]	Tolerancia de mecanizado [mm] <sup>*1</sup>	Tolerancia en forma [mm] <sup>*2</sup>
20	$\pm 0,10$	0,12
<sup>*1</sup> Estas tolerancias son aplicables si el valor nominal del área de la sección transversal original, $S_0$ , se ha de incluir en el cálculo sin tener que medirlo. <sup>*2</sup> Desviación máxima en las medidas del ancho a lo largo de la longitud paralela, $L_c$ , de la pieza de prueba.		

Tabla 34: Tolerancias en el ancho de la probeta según norma UNE-EN ISO 6892-1:2017 [54].

Se va a utilizar la longitud de la sección paralela reducida ( $L_c$ ) recomendada. Y el espesor de las probetas ( $a_0$ ) va a ser de 3 mm. Por tanto, las dimensiones máximas de las probetas serán de 140,0 x 20,0 x 3,0 mm.

En fabricación aditiva existe un factor clave que puede afectar a las propiedades de las piezas fabricadas, éste es la forma o manera de depositar el material o, lo que es equivalente, la forma de unir las capas o de segmentar la pieza. El plano de deposición del material determinará en gran medida las propiedades mecánicas finales de las probetas. Por tanto, las piezas obtenidas mediante estos métodos de FA presentan anisotropía. En la siguiente *Figura 67* se muestran algunas de las distintas formas de depositar el material de una probeta. De izquierda a derecha: Plano XZ (*Side* o *On-Edge*), plano XY (*Flat*) y plano ZY (*Vertical* o *Upright*).

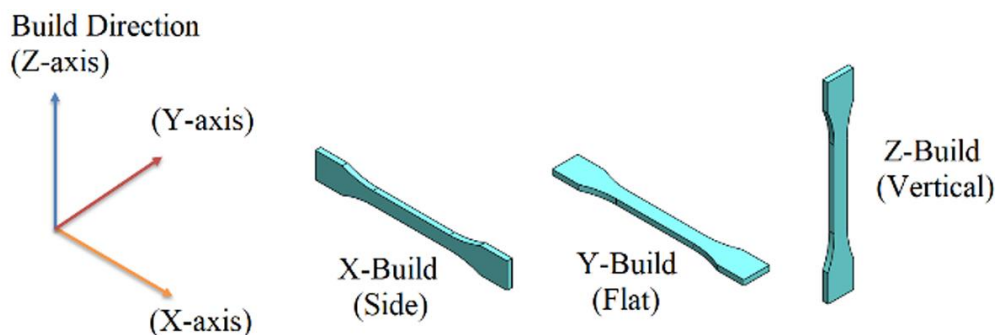


Figura 67: Dirección de crecida de las probetas. Fuente: [60].

Como la forma de construir las probetas afecta a sus propiedades mecánicas finales, se deben realizar probetas con distintas direcciones de crecido. Además, para obtener

resultados consistentes y fiables, se deben realizar réplicas, es decir, se debe repetir el ensayo y comparar los resultados obtenidos.

Cuanto mayor sea el número de réplicas realizado, mayor será la fiabilidad de los datos obtenidos y más atenuadas estarán las posibles desviaciones. Realizar ensayos comporta un coste y, por esto, se debe minimizar el número de réplicas a realizar. Se debe procurar obtener una muestra suficientemente grande y significativa que aporte datos consistentes, pero, al mismo tiempo, suficientemente pequeña para reducir el coste de los ensayos sin que las posibles desviaciones afecten a las conclusiones obtenidas en dichos ensayos.

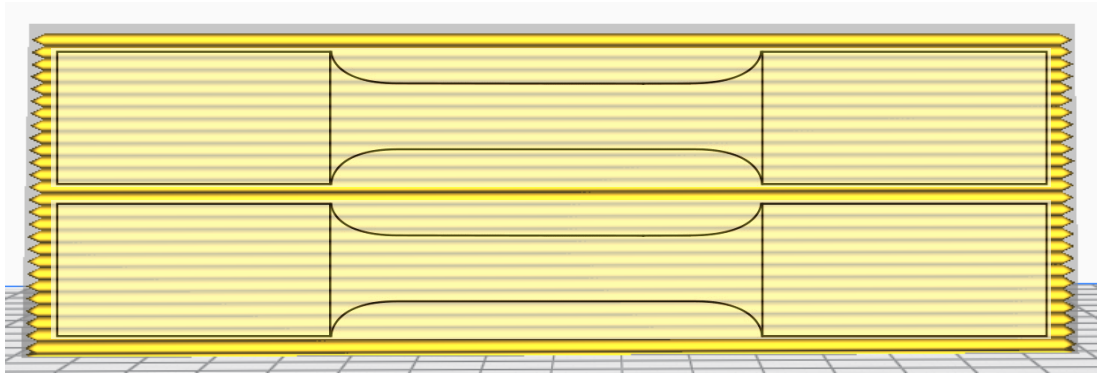
Dicho esto, en este estudio se van a realizar 4 réplicas de cada uno de los ensayos. Se van a realizar, por tanto, un total de 16 probetas para ensayos a tracción. A continuación, se detallan los ensayos a realizar y la obtención de las distintas probetas.

Se van a obtener un total de 8 probetas del tipo *Side* u *On-Edge* y 8 del tipo *Vertical* o *Upright*. De cada uno de estos grupos, 4 probetas se van a someter al ensayo de forma directa y las otras 4 se verán sometidas a un tratamiento térmico de normalizado previo al ensayo. No se van a realizar probetas del tipo *Flat* debido a la dificultad que puede suponer separar las probetas del metal base.

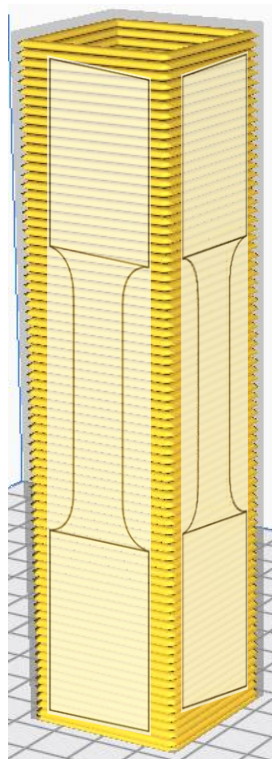
Para realizar las probetas, se utilizarán los códigos G generados en las pruebas 4 y 5 de la experimentación anterior “5.5. *Prueba paredes verticales e inclinadas*”. De cada prueba 4 se van a extraer dos probetas del tipo *Side* u *On-Edge*, tal y como se muestra en la siguiente *Figura 68* y, de cada prueba 5 se van a extraer cuatro probetas del tipo *Vertical* o *Upright*, tal y como se muestra en la siguiente *Figura 69*. Por tanto, se van a fabricar un total de cuatro pruebas 4 y dos pruebas 5 para la realización de esta experimentación.

De cada una de las pruebas la mitad de las probetas se van a someter a un tratamiento térmico y la otra mitad se ensayarán sin aplicar tratamiento térmico. Esto se hace así para que, si existen defectos en la fabricación, no se produzcan únicamente en las probetas con tratamiento térmico o, por el contrario, en las probetas sin tratamiento térmico. De esta forma, cada probeta será obtenida de pruebas distintas y la fiabilidad de los datos obtenidos será mayor.

Como la explicación anterior puede resultar algo confusa, se presentan en las siguientes páginas unos esquemas y figuras que aclaran el proceso de obtención de las distintas probetas. El esquema presentado en la *Figura 70* esclarece el procedimiento.



*Figura 68: Esquema de la extracción de las probetas tipo Side u On-Edge (pared simple de 156 x 54 mm obtenida mediante la prueba 4 de la anterior experimentación). Esta figura no está a escala.*



*Figura 69: Esquema de la extracción de las probetas tipo Vertical o Upright (prisma cuadrangular regular de 35 x 35 x 156 mm obtenido mediante la prueba 5 de la anterior experimentación). Esta figura no está a escala.*

En la siguiente *Figura 70* se muestra de forma esquemática la obtención de las probetas para la realización de los distintos ensayos a tracción. Se muestran el total de las 16 probetas y las pruebas de las que se extraen. De cada prueba se extraen varias probetas. Se alternan las probetas sometidas a tratamiento térmico para disminuir las posibles desviaciones que puedan producirse en la fabricación de cada una de las pruebas.

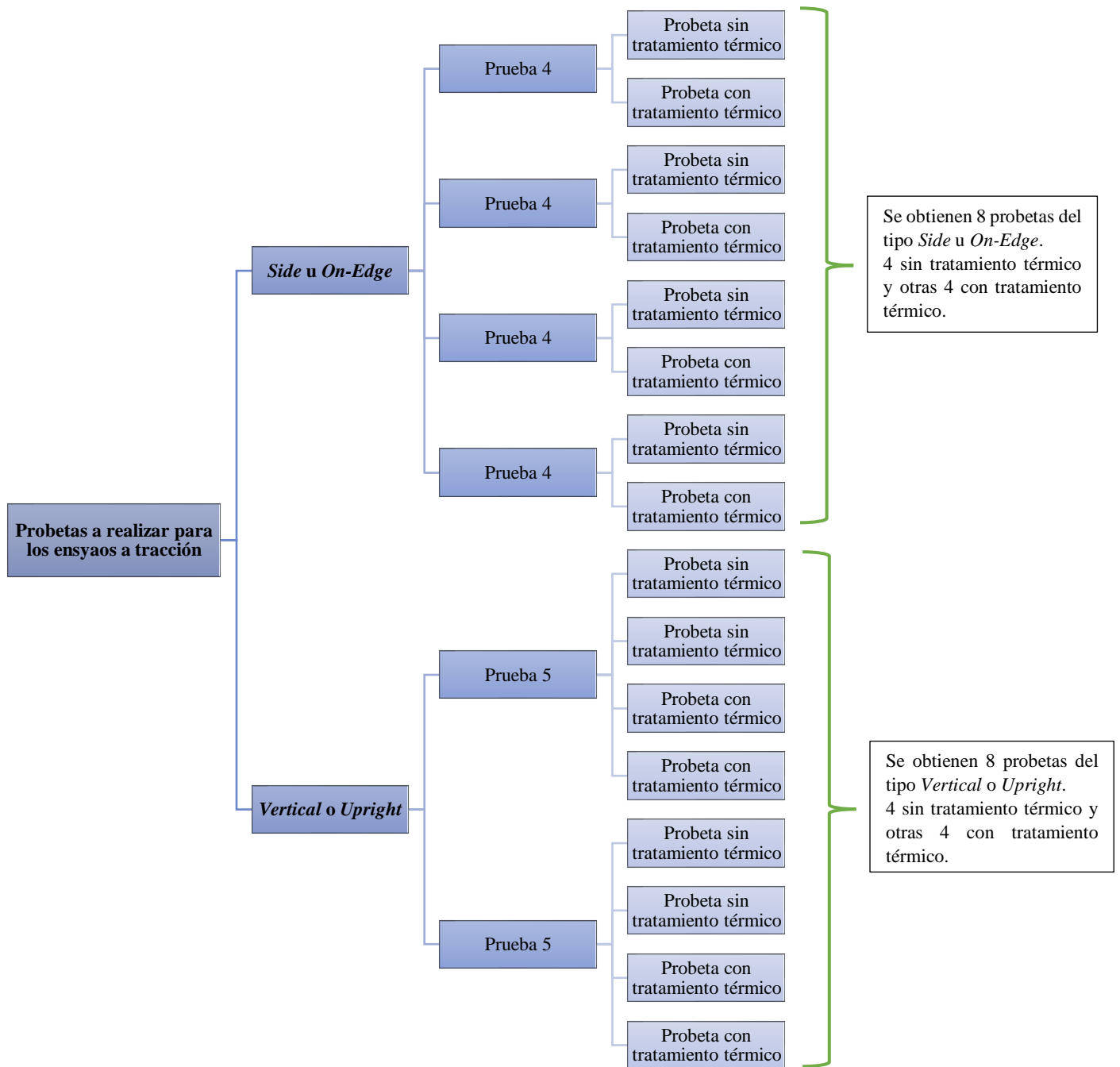


Figura 70: Esquema de la obtención de las distintas probetas.

### 5.6.3 Análisis de los resultados obtenidos

Tras la realización de los ensayos descritos en el anterior apartado “5.6.2. *Plan de experimentación*”, se obtendrán un conjunto de datos que deberán ser analizados. Los datos obtenidos en los ensayos serán la carga aplicada [N], el tiempo [s], la extensión [mm], la tensión aplicada (MPa) y la deformación [mm/mm o en %]. De todos éstos los más útiles serán los valores de tensión y deformación.

Con los valores de tensión y deformación, se pueden realizar los diagramas de tensión-deformación. Estos diagramas ayudarán a interpretar el comportamiento de cada una de las probetas realizadas. En el diagrama se podrá identificar claramente la zona elástica, la zona de fluencia o plástica perfecta, la zona de endurecimiento por deformación y la zona de estricción/rotura. Además, se podrán señalar algunos puntos clave.

Algunos de los valores más importantes que podemos obtener de estos ensayos son: el módulo elástico o módulo de Young (E), la tensión de fluencia ( $\sigma_y$ ), la tensión máxima ( $\sigma_{max}$ ), la tensión de rotura ( $\sigma_r$ ) y la deformación hasta rotura ( $\epsilon_r$ ), entre otros.

El módulo de elasticidad o módulo de Young (E), se puede calcular mediante la ecuación que se muestra a continuación. Esta ecuación representa el pendiente del tramo lineal de la zona elástica.

$$E = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$$

Tras obtener todos estos datos, se va a realizar un pequeño estudio estadístico de los datos obtenidos para probetas del mismo tipo de ensayo. Es decir, se va a realizar la media de los distintos valores y se observarán las posibles desviaciones que puedan existir entre réplicas o probetas del mismo tipo (recordamos que se han realizado 4 réplicas para cada tipo de ensayo). Si las desviaciones entre réplicas son muy elevadas significará que las piezas contienen defectos, que el proceso de fabricación no es estable, que es necesario tomar una muestra mayor (realizar más réplicas) o que se ha cometido algún error al realizar las probetas. Tras el estudio estadístico, deberemos obtener los valores promedio de:

- Probetas *Side* u *On-Edge* sin tratamiento térmico.
- Probetas *Side* u *On-Edge* con tratamiento térmico.
- Probetas *Vertical* o *Upright* sin tratamiento térmico.
- Probeta *Vertical* o *Upright* con tratamiento térmico.

Una vez realizado todo el tratamiento de los datos obtenidos, se procederá a comparar entre las distintas tipologías de probetas. Primeramente, se comparará como afecta el tratamiento térmico comparando los valores de probetas con y sin tratamiento térmico depositadas en la misma dirección de crecida. Posteriormente, también, se compararán los resultados entre las distintas técnicas de deposición del material a igual tratamiento térmico.



Para la realización de estos estudios comparativos, se tendrá en cuenta la variación de los valores de: módulo elástico o módulo de Young ( $E$ ), tensión de fluencia ( $\sigma_y$ ), tensión máxima ( $\sigma_{\max}$ ), tensión de rotura ( $\sigma_r$ ) y deformación hasta rotura ( $\epsilon_r$ ) entre unos ensayos y otros.

Finalmente, se compararán los resultados obtenidos en las distintas pruebas con los valores que establece la norma AWS A5.18 [26] para el material de aportación utilizado (ER-70S-6). Dichos valores se indican en la siguiente *Tabla 35*.

<b>Requerimientos mínimos de tensión del material de aportación</b>			
<b>Material de aportación</b>	<b>Tensión de fluencia (<math>\sigma_y</math>) (mínimo)</b>	<b>Tensión de rotura (<math>\sigma_r</math>) (mínimo)</b>	<b>Elongación (mínimo)</b>
<b>ER-70S-6</b>	[MPa] [psi]	[MPa] [psi]	%
	400 [58.000]	480 [70.000]	22

*Tabla 35: Requerimientos mínimos de tensión para el material de aportación utilizado (ER-70S-6) según norma AWS A5.18.*

Se estima que las probetas del tipo *Vertical* o *Upright* presentarán menor resistencia a la tracción que las del tipo *Side* u *On-Edge*. También, se estima que las probetas sin tratamiento térmico presentarán menor resistencia a la tracción que las que han sido sometidas a un tratamiento térmico de normalizado. Por tanto, se estima que las probetas que presentarán mayor resistencia a la tracción serán las del tipo *Side* u *On-Edge* con tratamiento térmico. Por último, también, se estima que, la resistencia a la tracción de las piezas obtenidas mediante esta tecnología será inferior a la del material en bloque o a la de los valores presentados en la *Tabla 35*. Todas estas estimaciones son, como se dice, estimaciones, predicciones y comportamientos esperados. No serán ciertas hasta que se realice la experimentación y la comprobación correspondiente. Como la situación actual (pandemia del coronavirus COVID-19) no ha permitido la realización experimental de este proyecto, se citan algunos de los comportamientos esperados, pero no son para nada las conclusiones definitivas.

## 5.7. Resumen de las experimentaciones

En este apartado, se resumen el total de las experimentaciones propuestas anteriormente.

En la siguiente página se muestra, en la *Figura 71*, un esquema del total de las pruebas a realizar según experimentación. También se muestra, en la *Tabla 36*, un cómputo global del tiempo de fabricación, de la cantidad de material de aportación necesario, del consumo de gas de protección (argón) y del consumo eléctrico para la realización de todas las experimentaciones.

Para el cómputo global se ha tenido en cuenta que se realizan todas las pruebas de la experimentación I una vez, todas las pruebas de la experimentación II una vez y, por último, para la realización de la experimentación III, se realizan cuatro pruebas 4 y dos pruebas 5 de la anterior experimentación II.

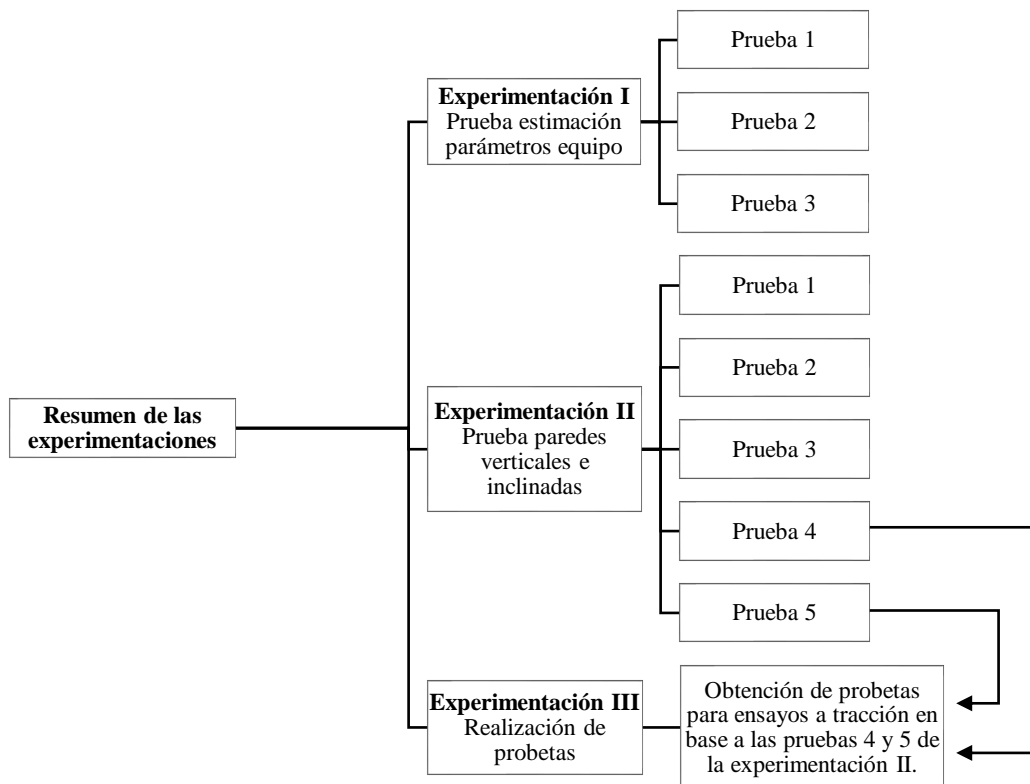


Figura 71: Esquema resumen del total de experimentaciones y pruebas a realizar.

Cálculos globales del total de las experimentaciones				
Experimentación	I	II	III	TOTAL
Tiempo total de fabricación [s] [min]	701,5 [11,7]	7.802,0 [130,03]	15.616,0 [260,27]	24.119,5 [402]
Longitud de hilo [mm]	20.935,40	143.883,30	298.000,00	462.818,70
Volumen de material aportado [mm <sup>3</sup> ]	10.523,30	72.323,65	149.791,16	232.638,11
Masa de material aportado [g]	82,60	567,74	1.175,86	1.826,20
Consumo de gas de protección [l]	58,46	650,35	1.301,30	2.010,11
Consumo de energía eléctrica [kWh]	0,700	5,881	11,994	18,575

Tabla 36: Cálculos globales del total de las experimentaciones.

## 6. PLANIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN

A lo largo de este apartado se comenta la planificación y organización seguida en la realización de este estudio. Inicialmente, puede parecer una sección, ciertamente, banal e irrelevante, pero, justamente en este estudio, ha tenido un gran trascendencia. La realización de este estudio ha coincidido con un hecho que ha afectado al total de la sociedad, la pandemia del coronavirus COVID-19. Tras decretarse el estado de alarma en el país, se procedió al confinamiento de la población y al cese de la mayoría de las actividades. La situación obligó a reorganizar y a replanificar el contenido y el enfoque de este estudio, ya que tenía, inicialmente, una gran componente experimental. Esta componente experimental no se ha podido desarrollar porque para ello se requería el equipamiento disponible en los laboratorios de la universidad. Por tanto, se han tenido que modificar y adaptar contenidos. A lo largo de esta memoria ya se ha citado, en algunas ocasiones, este suceso de gran trascendencia.

La tutorización y dirección de este estudio se han visto obligadas a realizarse de forma no presencial y, la defensa de éste, también, será en modalidad no presencial. Por tanto, se ha tenido que realizar una adaptación a esta situación de excepcionalidad. Sin una buena planificación y organización, el correcto desarrollo de este estudio no habría sido posible. Es en estos momentos donde se exalta la importancia de una reacción rápida y de una reorganización y replanificación del trabajo a realizar para lograr una adaptación fructífera.

Dicho esto, en este apartado se muestra el planteamiento del grueso de las tareas realizadas y la organización de acuerdo con el calendario del proyecto.

### 6.1. Estructura de descomposición del trabajo

En este subapartado se define de forma genérica la estructura de descomposición del trabajo, también conocida como WBS (del inglés *Work Breakdown Structure*). Ésta se muestra de forma esquemática en la siguiente *Figura 72*.

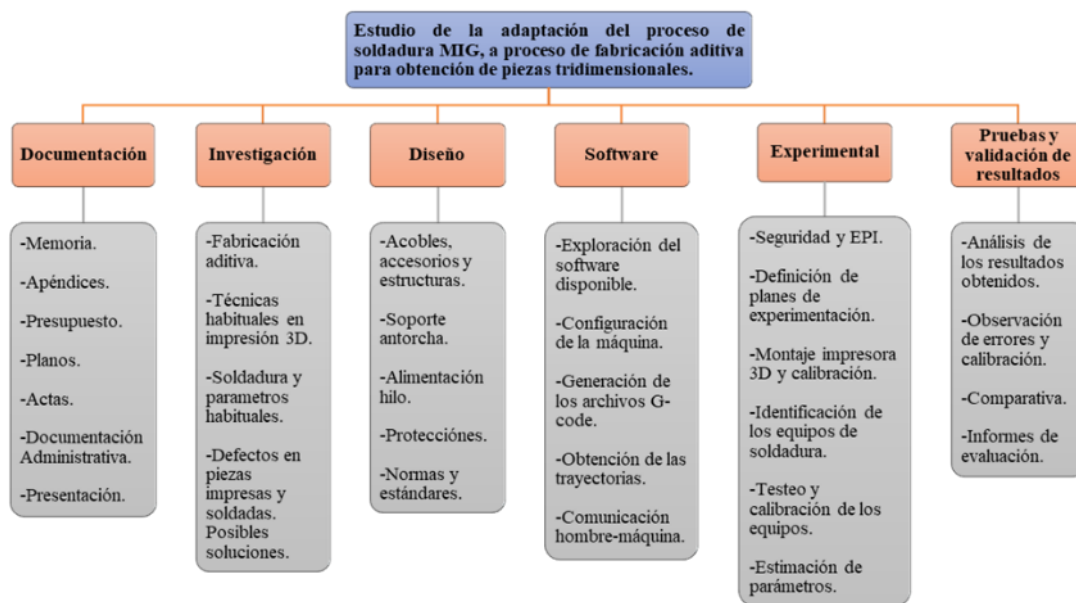


Figura 72: Estructura de descomposición del trabajo (WBS).

## 6.2. Descripción de tareas y horas necesarias.

En este subapartado se presentan las tareas que se han realizado y la previsión de las horas de dedicación. Se definen en la siguiente *Tabla 37*.

Tarea	Descripción	Horas
Especificaciones y definición del proyecto	Limitar el proyecto y realizar una primera definición de éste.	15
Reuniones	Realización de reuniones, documentación asociada (actas) y sesiones de trabajo.	20
Revisión del material disponible	Ver el material disponible en el laboratorio para estudiar todas las posibilidades y definir aún más el proyecto.	2
Project Charter	Elaboración del Project Charter y la planificación y organización del proyecto.	8
Estudio Soldadura	Investigar y realizar autoaprendizaje sobre las distintas técnicas de soldadura	40
Estado del Arte	Analizar la actual situación del mercado sobre la Fabricación Aditiva.	20
Normativa	Revisar la normativa vigente.	15
Memoria	Realización de la memoria del proyecto. Revisión de la ortografía y adecuación a los correctos formatos. Adecuarse a las recomendaciones de buenas prácticas.	80
Documentación	Realización de la documentación necesaria.	20
Seguridad	Estudiar los equipos de protección individual necesarios, evaluar riesgos, definir protocolos de actuación y revisar la normativa vigente.	10
Asistencia a eventos	Asistir a eventos o webinars relacionados con el fin de obtener información provechosa para la realización del trabajo. P. ej. Feria <i>Advanced Factories</i> .	20
Montaje impresora 3D	Realizar el montaje de la impresora 3D.	10
Calibración de la impresora 3D	Calibrar la impresora y realizar primeras pruebas de impresión.	4
Instalación de software	Acondicionar los equipos informáticos al uso que se les dará durante el proyecto.	4
Materiales	Estudio de los materiales más convenientes y su obtención.	10
Estudio de los posibles defectos	Investigar sobre los posibles defectos que pueden aparecer durante el proceso de soldadura e impresión y evaluar las posibles soluciones.	8
Medición	Toma de medidas para el posterior diseño de los distintos elementos.	3
Alimentación del hilo	Estudiar el mejor sistema de alimentación del hilo y diseñarlo.	45

Tarea	Descripción	Horas
Diseño acople	Diseñar el soporte de la antorcha para la impresora 3D.	30
Diseño protecciones	Estudiar la forma de proteger el cableado, la estructura y la electrónica de la impresora 3D.	10
Planos	Realizar los planos requeridos.	20
Estudio de la electrónica	Estudiar la electrónica que está disponible y su firmware para realizar una comparativa y decidir si usar la electrónica por defecto u otra distinta.	15
Configuración de la máquina	Configurar la máquina para que realice las acciones de la forma correcta.	25
Comunicación hombre-máquina	Establecer los protocolos de comunicación.	4
Diseño de planes de experimentación	Diseñar experimentaciones a nivel teórico con el fin de observar el funcionamiento del equipamiento y, poder así, realizar los ajustes adecuados.	30
Obtención de las trayectorias.	Realizar las trayectorias deseadas.	25
Obtención del G-code	Obtener el código de control numérico. Dependiendo de si el código se genera automáticamente o de si el código debe ser modificado de forma manual se invertirá un tiempo u otro. En su mayoría debe modificarse de forma manual.	35
Simulación	Simular los movimientos de la máquina y observar posibles defectos en la realización de las trayectorias.	4
Ajuste parámetros	Ajustar parámetros de soldadura e impresión en base a estimaciones de estudios similares.	15
Diseño de probetas	Diseñar las probetas según norma de ensayos a tracción.	15
Análisis de los resultados	Explicar cómo se va a realizar el análisis de los resultados. Incluyendo aspectos como la metalografía, la zona ZAT, los posibles defectos e imperfecciones en soldadura, diagramas tensión-deformación, etcétera. Esclarecer las posibles causas de la obtención de resultados poco satisfactorios.	30
Presupuesto	Realización del presupuesto.	8
Análisis medioambiental	Breve análisis del impacto medioambiental.	4
Defensa del proyecto	Elaborar y preparar la defensa del proyecto.	8
<b>TOTAL</b>	<b>-</b>	<b>612 h</b>

Tabla 37: Tareas realizadas con la previsión de las horas de dedicación.



La duración total del estudio es de 612 horas. El tiempo de dedicación total entra dentro de los márgenes establecidos, ya que la dedicación del estudio debe ser de 24 créditos académicos. Un crédito académico equivale a unas 25-30 horas de dedicación. Por tanto, por norma general, se exige una dedicación aproximada de 600 horas.

### 6.3. Diagrama de Gantt

Para facilitar la planificación y organización del proyecto se ha realizado un diagrama de Gantt para identificar la dependencia y secuencialidad entre tareas. La distribución temporal dependerá en gran medida de unas fechas clave, son las siguientes:

- 19/02/2020: Reunión inicial TFG.
- 20/03/2020: Entrega Project Charter.
- 14/04/2020: Primer Seguimiento.
- 05/05/2020: Segundo Seguimiento.
- 15/05/2020: Tercer Seguimiento.
- **30/06/2020: Entrega Final Proyecto.**
- Del 14 al 30/07/2020: Tribunales, defensa del proyecto.

El diagrama de Gantt es sólo algo orientativo. La dedicación a cada una de las tareas de forma diaria no será la misma y paralelamente podrán desarrollarse varias tareas. Se estima que de media se dedicarán unas 4-5 horas diarias al desarrollo del proyecto. Esto podrá variar según la situación y carga de trabajo.

Respecto a la planificación inicial, algunos de los contenidos y fechas previstas se han visto modificados debido a la situación excepcional decretada de confinamiento y estado de alarma debido a la expansión del coronavirus (COVID-19). Como este proyecto presentaba, inicialmente, una gran parte experimental, algunas de sus tareas no se han podido desarrollar con normalidad, en su defecto, el proyecto ha tomado una vertiente más teórica. Este apartado, muestra únicamente la planificación y organización definitiva.

Las tareas programadas y su situación en el tiempo se muestran en la siguiente *Tabla 38*:

Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin	Nombre	Fecha de inicio	Fecha de fin
• Reuniones	21/02/20	29/06/20	• Estudio posibles defectos	5/03/20	10/03/20
• 1r Seguimiento	14/04/20	14/04/20	• Medición	17/03/20	17/03/20
• 2n Seguimiento	5/05/20	5/05/20	• Alimetación hilo	23/03/20	7/04/20
• 3r Seguimiento	15/05/20	15/05/20	• Diseño acople	7/04/20	16/04/20
• Especificaciones y definición del proyecto	19/02/20	21/02/20	• Diseño protecciones	10/04/20	13/04/20
• Revisión material disponible	21/02/20	21/02/20	• Planos	14/04/20	20/04/20
• Project Charter	12/03/20	18/03/20	• Estudio electrónica	21/04/20	23/04/20
• Estudio Soldadura	24/02/20	4/03/20	• Configuración de la máquina	27/04/20	1/05/20
• Estado del arte	21/02/20	26/02/20	• Comunicación hombre-máquina	24/04/20	24/04/20
• Normativa	30/03/20	24/04/20	• Diseño de planes de experimentación	4/05/20	11/05/20
• Normativa 2	4/05/20	6/05/20	• Obtención de trayectorias	12/05/20	18/05/20
• Memoria	23/03/20	30/06/20	• Obtención del G-code	19/05/20	29/05/20
• Documentación	10/06/20	30/06/20	• Simulación	1/06/20	1/06/20
• Seguridad	27/02/20	2/03/20	• Ajuste parámetros	12/05/20	14/05/20
• Asistencia eventos	3/03/20	4/03/20	• Diseño de probetas	15/05/20	19/05/20
• Montaje impresora 3D	12/03/20	12/03/20	• Análisis de los resultados	2/06/20	10/06/20
• Instalación de software	13/03/20	13/03/20	• Presupuesto	11/06/20	15/06/20
• Calibración impresora 3D	16/03/20	16/03/20	• Análisis medioambiental	16/06/20	17/06/20
• Materiales	18/03/20	19/03/20	• Defensa del proyecto	26/06/20	30/06/20

Tabla 38: Lista de tareas y situación temporal para su organización en el diagrama de Gantt.

El diagrama de Gantt del proyecto es el mostrado en la siguiente *Figura 73*:

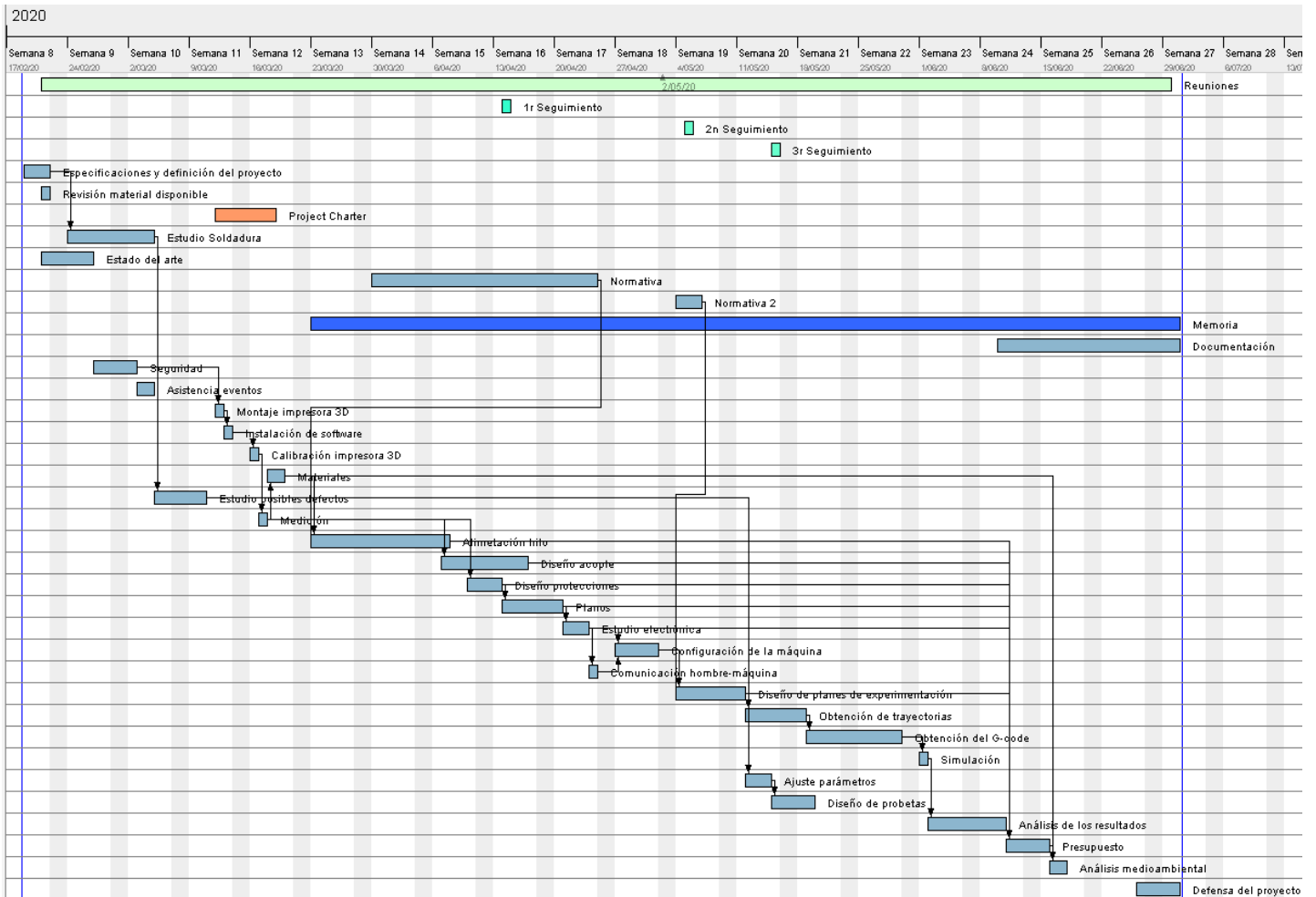


Figura 73: Diagrama de Gantt del proyecto.

## 7. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

A continuación, se presenta un resumen del presupuesto del estudio. El desglose de todos y cada uno de los costes se muestran en más detalle en el documento: *Presupuesto*. En este apartado, sólo se muestra un resumen de los cálculos globales.

Los costes del proyecto, básicamente, se han dividido en tres categorías: recursos humanos, consumo eléctrico y materiales. El coste total del desarrollo de este estudio asciende a **14.275,22 €**. Este valor no incluye el coste de fabricación de los elementos diseñados ni el coste de realización de las experimentaciones propuestas. En la siguiente *Tabla 39* se resumen los costes del estudio. También, en la siguiente *Figura 74* se esquematizan los costes por categoría. Como se puede observar, la mayor parte de los costes recaen en los honorarios del equipo de ingeniería.

Si se desea, en el documento: *Presupuesto*, se puede consultar el coste de fabricación de los elementos diseñados, el coste de la realización de las experimentaciones y los costes finales teniendo en cuenta dichos factores.

Costes finales del estudio	
Concepto	Coste
Recursos humanos	12.818,00 €
Consumo eléctrico	121,79 €
Materiales	1.335,43 €
<b>Total</b>	<b>14.275,22 €</b>

Tabla 39: Resumen de los costes finales del estudio.



Figura 74: Grafico circular de los costes finales del estudio (sin incluir costes de fabricación de los componentes diseñados ni de experimentación).

## 8. IMPLICACIONES MEDIOAMBIENTALES

Estudiar el impacto medioambiental de las acciones que se realizan es fundamental para tomar decisiones y actuar siendo respetuosos con el medioambiente. Reducir los residuos y las emisiones producidas debe ser un objetivo y un hábito por el bien del planeta y del ecosistema en el que vivimos. En este apartado, se analiza, de forma breve, el impacto medioambiental asociado a la realización de este estudio.

Realizar un informe de sostenibilidad puede entrañar cierta complejidad, ya que las acciones realizadas conllevan infinidad de actividades asociadas. En este estudio no se pretende realizar un informe de sostenibilidad detallado, ya que sería muy complejo y no entra dentro del alcance de este estudio. Solamente, se va a realizar un pequeño análisis de las actividades realizadas y del impacto medioambiental que éstas pueden tener asociado.

Éste ha sido un estudio totalmente teórico y, por tanto, no se han realizado actividades que implicaran un gran impacto medioambiental. La actividad más contaminante realizada está relacionada con el consumo de energía eléctrica, ya que durante el 80 % del tiempo invertido en este estudio se ha utilizado un ordenador portátil. Es decir, durante un total de 490 horas se ha utilizado un ordenador portátil con una potencia de, aproximadamente, 180 W. También, durante el 50 % del tiempo invertido en este estudio, se ha requerido de iluminación. Es decir, durante 306 horas se ha utilizado una iluminación con una potencia aproximada de 30 W.

El factor de emisión de la energía eléctrica, también conocido como, el mix, sirve para calcular, de forma aproximada, la cantidad de CO<sub>2</sub> generada por kWh de energía generada. Este factor dependerá, en gran medida, de la red eléctrica de la zona y de las fuentes generadoras de energía. Según datos de la Oficina Catalana del Cambio Climático (OCCC, *Gencat*), el mix eléctrico de la red eléctrica española correspondiente al año 2019 (los datos más recientes son del año anterior) es de 241 g CO<sub>2</sub>/kWh [61]. Mediante este factor, se puede calcular el CO<sub>2</sub> generado. En la siguiente *Tabla 40* se muestran los datos de CO<sub>2</sub> generado en base a la energía eléctrica consumida. Para la realización de este estudio (parte teórica), se obtiene que se han generado un total de **23,47 kg de CO<sub>2</sub>**. Si se llevarán a cabo todas las experimentaciones planteadas, el total de CO<sub>2</sub> generado sería de 27,95 kg.

CO <sub>2</sub> generado en base a la energía eléctrica consumida			
Concepto	Energía	Mix eléctrico 2019	CO <sub>2</sub> generado
	[kWh]	[kg CO <sub>2</sub> /kWh]	[kg]
Ordenador	88,200	0,241	21,26
Iluminación	9,180	0,241	2,21
Total estudio (Parte teórica)	-	-	<b>23,47 kg</b>
Realización de experimentaciones	18,575	0,241	4,48
Total	-	-	<b>27,95 kg</b>

Tabla 40: CO<sub>2</sub> generado en base a la energía eléctrica consumida.

Respecto a los residuos radioactivos generados por el consumo de energía eléctrica, se toma de referencia el factor de 0,51 mg/kWh de residuos radioactivos generados (valor medio en España durante 2018, según CNMC (Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia)). En la siguiente *Tabla 41* se muestra la cantidad de residuos radiactivos generada en base a la energía eléctrica consumida. Para la realización de este estudio (parte teórica), se obtiene que se han generado un total de **49,66 mg de residuos radioactivos**. Si se llevarán a cabo todas las experimentaciones planteadas, el total de residuos radioactivos generados sería de 59,13 mg.

Residuos radioactivos generados en base a la energía eléctrica consumida			
Concepto	Energía	Residuos radioactivos generados por unidad de energía	Residuos radioactivos
	[kWh]	[mg/kWh]	[mg]
Ordenador	88,200	0,51	44,98
Iluminación	9,180	0,51	4,68
Total estudio (Parte teórica)	-	-	49,66 mg
Realización de experimentaciones	18,575	0,51	9,47
Total	-	-	59,13 mg

Tabla 41: Residuos radioactivos generados en base a la energía eléctrica consumida.

En las anteriores tablas se puede observar que, en la realización de este estudio, la actividad con mayor impacto medioambiental es el uso del ordenador. De todas formas, este estudio tiene un impacto medioambiental bajo, ya que se ha tratado de trabajar en zonas con iluminación natural, el consumo eléctrico no ha sido elevado y, tampoco se han llevado a cabo actividades como la fabricación o experimentación.

Obviamente, las actividades no realizadas durante este estudio no se han tenido en cuenta. Es decir, el impacto de fabricar los elementos diseñados y el impacto de realizar las experimentaciones planteadas no se ha tenido en cuenta, ya que dichas actividades no se han llevado a cabo (debido a la pandemia del coronavirus COVID-19). El impacto medioambiental del proyecto si se fabricaran los elementos diseñados sería mucho mayor. Habría que tener en cuenta muchos más factores como: un consumo eléctrico mayor, la correcta gestión de los residuos generados (virutas metálicas, materiales sobrantes, taladrina y lubricantes contaminados, herramientas desgastadas, etcétera) y, el tratamiento de los gases de soldadura antes de su liberación a la atmosfera, entre otros.

Además, la situación actual genera una nueva problemática. La pandemia del coronavirus fuerza el uso de determinados EPIs desechables (mascarillas y guantes) y productos desinfectantes. El aumento de este tipo de residuos está generando una gran problemática, ya que requieren de una gestión especializada y, en ocasiones, no son tratados de la forma adecuada. Por tanto, en caso de utilizarse, éstos deben desecharse de forma correcta.



## 9. CONCLUSIONES

En este estudio se ha adaptado una máquina de soldadura TIG a una impresora 3D FDM. Se ha reconvertido dicha impresora, destinada a fabricar piezas plásticas, en una máquina de fabricación aditiva metálica capaz de fabricar pequeñas piezas tridimensionales de acero al carbono.

Para realizar esta adaptación, en primer lugar, se investigó acerca de las distintas tecnologías de fabricación aditiva. Tras estudiar todas las posibilidades, se ha considerado que el proceso de deposición de energía dirigida es el más adecuado y el que mejor adaptabilidad presenta frente a las características de este estudio. Más concretamente, la tecnología WAAM presenta gran afinidad con este estudio; el análisis y estudio de ésta, ha servido de referencia constante a lo largo del desarrollo de este estudio. Los distintos procesos de FA han demostrado presentar ventajas frente a técnicas de fabricación convencionales como el ahorro de material, el menor tiempo entre la fase de diseño y la obtención del producto final y la posibilidad de realizar piezas complejas de forma más sencilla. Obviamente, los procesos de FA aún están en desarrollo con el fin de obtener mayor precisión y repetitividad, mejor acabado superficial y un marco normativo estable.

Tras analizar las distintas técnicas de FA, fue necesario investigar sobre las distintas formas de aportar dicha energía dirigida. Tecnologías como el láser y el haz de electrones presentan grandes ventajas, pero su alto coste y su dificultad de adaptación, las hacen inviables en un proyecto de estas características. De forma que se optó por utilizar el arco eléctrico asociado a los procesos de soldadura como fuente de energía térmica para fundir el material de aportación. Entre todas las clases de soldadura existentes, las que mejor adaptabilidad presentan, en lo que a este estudio se refiere, son la soldadura GMAW (MIG) y la soldadura GTAW (TIG). En este estudio, se ha decantado por la soldadura TIG por la gran limpieza y calidad de los cordones obtenidos, las menores proyecciones generadas durante el proceso, la posibilidad de controlar de forma independiente el arco y el material de aportación y, la mayor adaptabilidad al presentar antorchas de tamaño y peso más reducido, entre otros.

Una vez clara la tecnología de soldadura a utilizar, se han realizado todas las adaptaciones necesarias. Se ha establecido la configuración del equipo de soldadura y se han diseñado todos los elementos necesarios. Estos elementos, principalmente, son: el soporte de la antorcha, el equipo alimentador del material de aportación y, las protecciones necesarias para el equipo. En el diseño de todos ellos se han utilizado elementos estandarizados y se ha procurado realizar un diseño lo más universal y adaptable posible.

Durante el diseño de este proceso de fabricación, se han tenido siempre en cuenta las medidas de seguridad necesarias. Tanto para el personal como para los elementos de la máquina e instalación.

La programación de las trayectorias y la metodología de trabajo ha sido un punto clave en el desarrollo de la instalación de FA. En este punto, se incluye la elección de la electrónica, el *firmware* y el *software* utilizados. Se ha optado por reutilizar la electrónica de la máquina original con el firmware por defecto, ya que tras realizar diversas pruebas el funcionamiento era el esperado y, también, era adecuado y suficiente para los

requerimientos de la máquina. Respecto al *software*, se ha utilizado *SolidWorks*® como programa de CAD y *Ultimaker Cura 4.5* como software laminador.

Lo siguiente ha sido realizar una serie de calibraciones y modificaciones en la máquina. Con el fin de ajustar todos los parámetros de la máquina y de probar la calidad de las piezas obtenidas, se han propuesto y desarrollado tres planes de experimentación que constan de distintas pruebas. Estos planes se han desarrollado de forma teórica, ya que debido a la situación (pandemia del coronavirus COVID-19) no se han podido desarrollar de forma experimental. En ellos se desarrolla, al completo, el proceso de obtención de las trayectorias y las modificaciones necesarias del código G. La mayoría de las trayectorias se han obtenido de forma manual, aunque, en determinadas ocasiones, se ha valido del soporte de un fichero CAD y del código obtenido mediante el programa laminador.

El proceso de fabricación creado requiere del cálculo de la cantidad de material de aportación. En base a la velocidad de avance, la trayectoria realizada y la velocidad del material de aporte deseada, se calcula la cantidad exacta del material a aportar en cada momento. Tras obtener estos datos, éstos se introducen manualmente en el código G. También, se introducen manualmente en el código G, los movimientos requeridos para iniciar y cortar el arco eléctrico. Tras todos estos cambios, se obtiene el código requerido.

Esta forma de crear las trayectorias de la máquina es altamente manual y es uno de los aspectos a mejorar en este estudio. Realizar las trayectorias de forma prácticamente manual es ineficiente a nivel productivo. Es válido y factible para geometrías de pieza sencillas y para pequeñas pruebas como las propuestas en los planes de experimentación, pero en piezas con geometrías más complejas el tiempo a invertir es tan elevado que limita su fabricación. Es por esto por lo que, en las futuras líneas de trabajo, se propone realizar un software de laminación adecuado y adaptado al proceso de fabricación generado que permita realizar todos los cálculos y modificaciones del código de forma automática.

En los planes experimentales diseñados, se muestra la forma de analizar la calidad de las piezas obtenidas y, también, se muestran indicaciones de los cambios a realizar en los distintos parámetros de la máquina según los resultados obtenidos. Se definen, por tanto, las técnicas de inspección visual para detectar defectos e imperfecciones, la metalografía como método de evaluación de la calidad microestructural obtenida y como método predictivo de las propiedades mecánicas obtenidas y, finalmente, el ensayo a tracción como ensayo destructivo comprobador de las propiedades mecánicas obtenidas según el plano de deposición y el tratamiento térmico posterior aplicado.

Por último, se muestran los cambios a nivel de planificación y organización que ha sufrido este estudio y también, el presupuesto y el impacto medioambiental que ha tenido la realización de dicho estudio. Además, se proponen algunas de las futuras líneas de trabajo realizables en un futuro.

En conclusión, la adaptación realizada es teóricamente, sobre el papel, factible. Se han estudiado todas las posibilidades y también, todo lo que podría suceder al llevar este estudio al terreno experimental. Se considera, por tanto, que el estudio ha sido exitoso, ya que se han cumplido todos los objetivos propuestos en base al alcance y los requerimientos establecidos.

## 9.1. Futuras líneas de trabajo

La futuras líneas de trabajo de este estudio se basan en llevar a cabo de forma experimental todo lo expuesto en este documento de forma teórica y, en establecer mejoras en el proceso de fabricación creado con el fin de optimizar y aumentar la productividad.

Uno de los trabajos futuros más obvios en este estudio es el de llevar a cabo el proyecto realizado y el conjunto de las experimentaciones, ya que por la situación vivida (pandemia del coronavirus COVID-19) solamente se ha podido desarrollar el estudio a nivel teórico.

Una gran mejora que ahorraría mucho tiempo en la realización de las trayectorias sería crear o adaptar un software de laminación específico para el proceso de fabricación desarrollado. De forma que, insertara de forma automática en el código G todas las instrucciones para iniciar, estabilizar y cortar el arco y que, también, calculase la cantidad de material de aportación requerida y la introdujese en dicho código G. Con esto se aumentarían las posibilidades de fabricación, debido a que, se podrían generar geometrías mucho más complejas a partir del fichero CAD sin un excesivo esfuerzo en la programación de las trayectorias.

Otro de los trabajos futuros es, estudiar la posibilidad de modificar el proceso de soldadura para convertirlo en un proceso *Hot Wire TIG* (HW-TIG), o lo que es lo mismo, TIG con aportación de hilo caliente. Esta técnica de soldeo se basa en electrificar el material de aportación con el objetivo de fundir el hilo de forma más rápida. De esta forma, la energía del arco se destina, en su mayoría, a fundir el metal base y, la energía del hilo se destina a fundir el material de aportación. Mediante la técnica HW-TIG se pueden obtener mayores tasas de aportación y, por tanto, se reduce el tiempo de fabricación y se es más productivo.

Otro trabajo futuro o, más bien, una idea a desarrollar es, el de mejorar el acabado superficial de las piezas obtenidas. Se propone la adición de más ejes a la máquina desarrollada para que, mediante un proceso de soldeo sin material de aportación, se unan y alisen las caras o crestas de los cordones generados en las superficies exteriores de la pieza. Obteniendo así, una superficie menos irregular y con un mejor acabado que reduciría los golpeteos y vibraciones en los mecanizados posteriores.

Por último, también, sería interesante realizar simulaciones térmicas, previas a la ejecución de la producción, del proceso de fabricación. Con esto, se podría reducir el tamaño de la zona ZAT y controlar la microestructura obtenida y, por tanto, controlar las propiedades mecánicas finales obtenidas en la pieza. Tras esto, se podrían realizar comparaciones entre lo simulado y lo obtenido con el fin de obtener un mayor control sobre el proceso de fabricación.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

Esta bibliografía se ha desarrollado siguiendo las recomendaciones marcadas en la norma UNE-ISO 690:2013 [62]. Las referencias bibliográficas se muestran ordenadas según el orden de aparición en el texto.

[1] Chaves Palacio, Julián. Desarrollo tecnológico en la primera revolución industrial. *Norba: Revista de historia* [En línea]. Universidad de Extremadura: 2004, vol. 17, págs. 93-109. ISSN-e 0213-375X. [Consulta: 30 marzo 2020]. Disponible en: <<https://dialnet.unirioja.es>>

[2] Bilbao, Luis M.; Lanza, Ramón. *Historia económica: Los inicios de la segunda revolución industrial, 1870-1914* [En línea]. Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, 2009. [Consulta: 30 marzo 2020]. Disponible en: <<https://repositorio.uam.es/>>

[3] Gurmai, Z.; Wijkman, A.; Prodi, V.; Guidoni, U.; Turmes, C. *Written declaration: on establishing a green hydrogen economy and a third industrial revolution in Europe through a partnership with committed regions and cities, SMEs and civil society organisations* [En línea]. European parliament, 2007. [Consulta: 30 marzo 2020]. Disponible en: <<https://www.europarl.europa.eu/>>

[4] Rifkin, J. *Liderando la tercera revolución industrial y una nueva visión social para el mundo abordar la triple amenaza de la recesión económica global, la seguridad energética y el cambio climático* [En línea]. Fundación ideas, 2010. ISBN: 978-84-9378843-8. [Consulta: 30 marzo 2020]. Disponible en: <<https://dialnet.unirioja.es>>

[5] Fernández L., J. D.; La industria 4.0: Una revisión de la literatura. *Actas de Ingeniería* [En línea]. Universidad Autónoma Latinoamericana Medellín, Antioquia: 2017, vol. 3, pág. 222-227. [Consulta: 03 abril 2020]. Disponible en: <<http://fundacioniai.org/actas/Actas3/Actas3.25.pdf>>

[6] ADDIMAT operated by AFM, Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D. *¿Qué es la fabricación aditiva?* [En línea]. Bilbao: ADDIMAT, 2019. [Consulta: 28 marzo 2020]. Disponible en: <<https://www.addimat.es/es/sector-fabricacion-aditiva>>

[7] Mancisidor, A. M.; Garciandia, F.; Setien, I.; Gil, E. Fabricación aditiva en actuadores activos de control de flujo optimizado para aviones de motor UHBR. *Interempresas, Impresión 3D Fabricación Aditiva*. IK4-Lortek. Molins de Rei, Barcelona: Interempresas Media, 2020, vol. 16, pág. 58-65. ISSN Revista: 2565-0726. También disponible en línea. ISSN Digital: 2462-0734.

[8] Molitch-Hou, M. *Frustum Topology Optimization Integrated into Siemens NX for 3D Printing* [En línea]. 29 marzo, 2017. [Consulta: 7 abril 2020]. Disponible en: <<https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14633/Frustum-Topology-Optimization-Integrated-into-Siemens-NX-for-3D-Printing.aspx>>

- [9] Schulz, B. *Wire Arc Additive Manufacturing Delivers Low Buy-To-Fly Ratios* [En línea]. Additive Manufacturing Media. 25 noviembre, 2019. [Consulta: 7 abril 2020]. Disponible en: <<https://www.additivemanufacturing.media/articles/wire-arc-additive-manufacturing-delivers-low-buy-to-fly-ratios>>
- [10] Giachino, J. W.; Weeks, W. *Técnica y práctica de la soldadura*. Reimpresión: septiembre de 2003. Barcelona: editorial reverté, s.a., 1981. ISBN 8429160531.
- [11] ICEX España Exportación e Inversiones. *Fabricación aditiva, un futuro de impresión... en 3D* [En línea]. ICEX, 08 noviembre 2018. [Consulta: 16 marzo 2020]. Disponible en: <<https://www.icex.es/icex/es/Navegacion-zona-contacto/revista-el-exportador/observatorio2/REP2018802190.html>>
- [12] Wohlers, T.; Gornet, T. *History of additive manufacturing* [En línea]. Wohlers associates, inc. 2014. [Consulta: 13 abril 2020]. Disponible en: <<http://www.wohlersassociates.com/history2014.pdf>>
- [13] Tridi. *Historia de la Impresión 3D* [En línea]. Tridi. 2020. [Consulta: 13 abril 2020]. Disponible en: <<https://www.tridimx.com/blog/historia-de-la-impresion-3d/>>
- [14] Loughborough University. *About Additive Manufacturing* [En línea]. Additive Manufacturing Research Group. Loughborough University. [Consulta: 10 abril 2020]. Disponible en: <<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg>>
- [15] Somerset Community College's (SCC) additive manufacturing program. *US community college 3D prints stainless steel for welding* [En línea]. Somerset Community College's. 21 febrero 2020. [Consulta: 10 abril 2020]. Disponible en: <<https://www.materialstoday.com/additive-manufacturing/news/us-community-college-3d-prints->>
- [16] Dassault Systemès. *Introduction to 3D printing - additive processes* [En línea]. Dassault Systemès. 3D experience. Processes-Make. 2018. [Consulta: 12 abril 2020]. Disponible en: <<https://make.3dexperience.3ds.com/processes/directed-energy-deposition>>
- [17] Engineering Product Design. *Sheet Lamination. What is Sheet Lamination?* [En línea]. Engineering Product Design. 2017-2019. [Consulta: 12 abril 2020]. Disponible en: <<https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>>
- [18] International Organization for Standardization (ISO). *Advanced Search* [En línea]. ISO/TC 261 Additive manufacturing. [Consulta: 16 marzo 2020]. Disponible en: <<https://www.iso.org/advanced-search>>
- [19] Asociación Española de Normalización (UNE). *Buscador de normas* [En línea]. Comité CTN 116/GT 1 Fabricación Aditiva. [Consulta: 16 marzo 2020]. Disponible en: <<https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas>>



- [20] infoPLC. *Norma DIN SPEC 17071 para simplificar la fabricación aditiva* [En línea]. infoPLC, 18 diciembre 2019. [Consulta: 16 marzo 2020]. Disponible en: <<https://www.infoplac.net/actualidad-industrial/item/107278-norma-din-spec-17071-fabricacion-aditiva>>
- [21] Addilan. *Nuestra Tecnología* [En línea]. Addilan, WAAM technology machines. [Consulta: 17 marzo 2020]. Disponible en: <<https://www.addilan.com/tecnologia/>>
- [22] Jeffus, L. *Soldadura. Principios y aplicaciones*. Quinta edición (Primera edición en español). Madrid: editorial Paraninfo, 2009. ISBN 9788428329378.
- [23] Scharlab. *Equipos de protección individual (E.P.I.). Protección de manos* [En línea]. Scharlab. The lab sourcing group. [Consulta: 23 abril 2020]. Disponible en: <[https://prevencio.uib.cat/digitalAssets/192/192146\\_guantes\\_scharlab.pdf](https://prevencio.uib.cat/digitalAssets/192/192146_guantes_scharlab.pdf)>
- [24] Westarco. *Caretas para soldar automáticas-Guía completa en 7 pasos* [En línea]. Westarco. ESAB. Centro de conocimiento. [Consulta: 23 abril 2020]. Disponible en: <<https://www.westarco.com/westarco/sp/education/blog/caretas-para-soldar-automaticas-guia-completo-en-7-pasos.cfm>>
- [25] Anet. *Página Oficial de la máquina Anet A8-Documentación del equipo* [En línea]. Anet 3D Printer. [Consulta: 27 abril 2020]. Disponible en: <<https://anet3d.com/>>
- [26] American Welding Society. *AWS A5.18/A5.18M:2005: Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding*. Florida: AWS (American National Standard Institute), 2005.
- [27] Lincoln Electric. *Acero Dulce, Recubrimiento de Cobre. AWS ER70S-6* [En línea]. Lincoln Electric. [Consulta: 08 junio 2020]. Disponible en: <[https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable\\_MIGGMAWWire-L-S-LS6/L-S6\\_ES-MX.pdf](https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWire-L-S-LS6/L-S6_ES-MX.pdf)>
- [28] Asociación Española de Normalización. *Soldeo y corte por arco. Electrodo de wolframio no consumibles. Clasificación. (ISO 6848:2015)*. UNE, Noviembre 2015.
- [29] SMP. *Electrodos de tungsteno* [En línea]. SMP aleaciones especiales. [Consulta: 30 abril 2020]. Disponible en: <<https://www.smp.es/electrodosdetungsteno>>
- [30] Maquisol. *Repuestos TIG WP9* [En línea]. Maquisol, una empresa de productos y servicios para soldaduras. [Consulta: 1 mayo 2020]. Disponible en: <<https://www.maquisol.com/producto/repuestos-tig-wp9/>>
- [31] Arcil, M. *Soldadura y corte de los aceros inoxidables*. Edición 2018. Madrid: Cedinox. Depósito legal: M-9358-2018. [Consulta: 1 mayo 2020]. Disponible en: <<https://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/Soldadura-y-corte-de-los-aceros-inoxidables-on-line.pdf>>
- [32] Soudure. *Débilitre pour bouteille jetable gaz neutre (Argon et Argon + CO<sub>2</sub>)* [En línea]. Soudure. [Consulta: 2 mayo 2020]. Disponible en: <<https://www.soudure.pro/debilitre-pour-bouteille-de-gaz-de-soudure/100118-debilitre-pour-bouteille-jetable-gaz-neutre-argon-et-argon-co.html>>



- [33] Xcsoure. *Argon CO<sub>2</sub> medidor de flujo de gas* [En línea]. Xcsoure. [Consulta: 2 mayo 2020]. Disponible en: <<https://www.xusatrips.com>>
- [34] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-EN ISO 898-1:2015: Características mecánicas de los elementos de fijación de acero al carbono y de acero aleado. Parte 1: Pernos, tornillos y bulones con clases de calidad especificadas. Rosca de paso grueso y rosca de paso fino. (ISO 898-1:2013)*. Madrid: AENOR, 2015.
- [35] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-EN ISO 3506-1:2010: Características mecánicas de los elementos de fijación de acero inoxidable resistente a la corrosión. Parte 1: Pernos, tornillos y bulones. (ISO 3506-1:2009)*. Madrid: AENOR, 2010.
- [36] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE 17108:1981: Tornillos y tuercas de acero. Momentos de apriete*. Madrid: AENOR, 1981.
- [37] Tregaskiss®. *How to Choose the Right MIG Gun Liner* [En línea]. Bernard, Tregaskiss®, Technical resources. [Consulta: 10 mayo 2020]. Disponible en: <<https://www.tregaskiss.com/how-to-choose-the-right-mig-gun-liner-p156896>>
- [38] E. Rambaldi, F. Prete, G. Timellini. *Propiedades térmicas y acústicas de las baldosas de gres porcelánico* [En línea]. Centro cerámico Bologna, Italia. Qualicer, Castellón (España): 2014. [Consulta: 21 mayo 2020]. Disponible en: <<https://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdfs/60%20PON%20ESP.pdf>>
- [39] American Society for Testing and Materials. *ASTM E 1530: Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique*. ASTM, 2011.
- [40] Santiago N., R. *Tabla de conductividad térmica. TB02* [En línea]. Fisicanet®. Buenos Aires, Argentina. [Consulta: 23 mayo 2020]. Disponible en: <<https://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/tb02-conductividad-termica.php>>
- [41] Domingo E., M. Aportaciones al conocimiento sobre la fabricación aditiva con la tecnología *Fused Deposition Modeling*. Tesis Doctoral, Universitat Ramon Llull, IQS School of Engineering, 2016.
- [42] International Organization for Standardization. *ISO 6983-1:2009. Automation systems and integration-Numerical control of machines-Program format and definitions of address words-Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems*. 2n edición. 2009. Norma previa: ISO 6983-1:1982. Comité técnico: ISO/TC 184/SC 1 Physical device control.
- [43] Ventura, V. *¿Qué es G-Code?* [En línea]. Polaridad.es, que circule la corriente. Diciembre 2014. [Consulta: 28 mayo 2020]. Disponible en: <<https://polaridad.es/que-es-g-code/>>
- [44] RepRap.org. *G-code* [En línea]. Última modificación: mayo 2019. [Consulta: 28 mayo 2020]. Disponible en: <<https://reprap.org/wiki/G-code>>

- [45] García G., C.; Conde G., A.; Daniel Gesto, D.; López, A. Estudio comparativo de la productividad y calidad obtenidas en la soldadura de tubos de calidad T9 empleados en el sector petroquímico, mediante los procesos TIG, HW-TIG y PAW. *Soldagem & Inspeção*. Julio/septiembre 2012, vol. 17, no. 3. ISSN 0104-9224.
- [46] Arregi, B.; Suarez, A.; Azpiroz, X.; Agote, I.; (Tecnalia); Valer, J.; (Aernnova). Fabricación aditiva de componentes estructurales de titanio. *Interempresas* [En línea]. Enero 2018. Trabajo presentado en el 21 Congreso de Máquinas-Herramienta y Tecnologías de Fabricación 2017 (Donostia). [Consulta: 25 febrero 2020]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/206612-Fabricacion-aditiva-de-componentes-estructurales-de-titanio.html>>
- [47] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-EN ISO 5817:2014: Soldeo. Uniones soldadas por fusión en acero, níquel, titanio y sus aleaciones (excluido el soldeo por haz de electrones). Niveles de calidad para las imperfecciones. (ISO 5817:2014)*. Madrid: AENOR, septiembre 2014.
- [48] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-EN ISO 6520-1:2009: Soldeo y técnicas afines. Clasificación de las imperfecciones geométricas en los materiales metálicos. Parte 1: Soldeo por fusión (ISO 6520-1:2007)*. Madrid: AENOR, abril 2009.
- [49] Carburos Metálicos. Manual del soldador. *Soldadura con gas de protección, oxicorte y corte por plasma*. Carburos Metálicos. Grupo Air Products and Chemicals: 2018. 231-18-039-ES.
- [50] Ortiz M., J. A. *Procesos de soldadura*. Apuntes asignatura: Tecnologías de fabricación y mantenimiento. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), ESEIAAT. Depto. Ingeniería Mecánica. Terrassa, 2019.
- [51] Madarieta-Churrua, M.; Pujana-Astarloa, J.; Garmendia S., I.; Leunda-Arrizabalaga, J. Additive manufacturing of metal components using concentric-wire laser metal deposition. *Dyna. Ingeniería e Industria*. Noviembre 2018, vol. 93, no. 6, p. 675-680. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8819>.
- [52] Prado-Cerqueira, J. L.; Camacho, A. M.; Diéguez, J. L.; Rodríguez-Prieto, A.; Aragón, A. M.; Lorenzo-Martín, C.; Yanguas-Gil, A. Analysis of favorable process conditions for the manufacturing of thin-wall pieces of mild steel obtained by wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials (Basel)*. Agosto 2018, vol. 11, no. 8, p. 1449. DOI: 10.3390/ma11081449.
- [53] American Society for Testing and Materials. *ASTM E3-11. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM, 2017.
- [54] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-EN ISO 6892-1:2017: Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente. (ISO 6892-1:2016)*. Madrid: AENOR, febrero 2017.

- [55] American Society for Testing and Materials. *ASTM E399-20: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM, 2020.
- [56] American Society for Testing and Materials. *ASTM E466-15: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM, 2015.
- [57] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-EN ISO 17296-3:2017: Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 3: Características principales y métodos de ensayo correspondientes. (ISO 17296-3:2014)*. Madrid: AENOR, mayo 2017.
- [58] Fernández G., I. *Estudio del comportamiento en rotura de un material metálico dúctil. Aspectos experimentales y numéricos* [En línea]. Trabajo fin de máster, UPM, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, septiembre 2015. [Consulta: 08 junio 2020]. Disponible en: <[http://oa.upm.es/38389/1/Tesis\\_master\\_Ignacio\\_Fernandez\\_Guerrero.pdf](http://oa.upm.es/38389/1/Tesis_master_Ignacio_Fernandez_Guerrero.pdf)>
- [59] American Society for Testing and Materials. *ASTM E8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM, 2016.
- [60] Langford, E; Griffiths, C. A. The mechanical strength of additive manufactured intraosseous transcutaneous amputation prosthesis, known as the ITAP. *AIMS Press* [En línea]. Septiembre 2018, vol. 5, no. 3, p. 135-150. DOI: 10.3934/bioeng.2018.3.133. [Consulta: 09 junio 2020]. Disponible en: <<https://www.aimspress.com/article/10.3934/bioeng.2018.3.133/fulltext.html>>
- [61] Oficina Catalana del Cambio Climático (OCCC). *Nota informativa sobre la metodología de estimación del mix eléctrico por parte de la oficina catalana del cambio climático (OCCC)* [En línea]. Generalitat de Catalunya, OCCC: 11 de febrero de 2020. [Consulta: 21 junio 2020]. Disponible en: <[https://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/04\\_ACTUA/Com\\_calcular\\_emissions\\_GEH/factors\\_emissio\\_associats\\_energia/200211\\_Nota-metodologica-mix\\_esp.pdf](https://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/04_ACTUA/Com_calcular_emissions_GEH/factors_emissio_associats_energia/200211_Nota-metodologica-mix_esp.pdf)>
- [62] Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-ISO 690:2013: Información y documentación. Directrices para la redacción de referencias bibliográficas y de citas de recursos de información*. Madrid: AENOR, mayo 2013.